

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

К. Бриндли

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

СПРАВОЧНОЕ ПОСОБИЕ

Перевод с английского
доктора технических наук
Е.И. СЫЧЕВА



МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1991

ББК 31.264.5

Б 87

УДК 62—791.2(035.5)

BRINDLEY K.

London, 1988

SENSORS AND TRANSDUCERS

Бриндли К.

Б 87 Измерительные преобразователи: Справочное пособие: Пер. с англ.—М.: Энергоатомиздат, 1991.— 144 с.: ил.

ISBN 5-283-02509-8

Описаны принципы действия, конструкции и параметры первичных измерительных преобразователей электрических, механических, химических и оптических величин, а также датчиков давления и температуры. Автор знакомит читателя с простейшими преобразователями, используемыми в измерительных и управляющих системах производственного назначения. Рассмотрены условия их применения и особенности монтажа.

Для широкого круга читателей, не обладающих специальной подготовкой в области измерительной техники.

Б 2004010000-183 37—91
051(01)-91

ББК 31.264.5

ISBN 5-283-02509-8 (рус.)

© Keith Brindley, 1988

ISBN 0-434-90181-4 (англ.)

© Перевод на русский язык,
Энергоатомиздат, 1991

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время широко применяются различные измерительные преобразователи. В любом каталоге электронных компонентов они представлены достаточно полно, причем каждый тип преобразователя имеет несколько вариантов исполнения. По внешнему виду не легко правильно выбрать преобразователь для реализации конкретной функции, поскольку в документации на него приводятся данные и описываются процедуры, которые скорее удержат инженера от желания использовать их, нежели убедят в том, что данный преобразователь наилучшим образом решит поставленную задачу. Однако выбор преобразователя для конкретного применения упрощается тем, что имеется интерфейс для включения его в измерительную систему. Хорошие знания обо всех типах измерительных преобразователей позволяют решить задачу выбора наилучшим образом, и только тогда можно быть полностью уверенным в правильности использования каждого преобразователя.

Целью настоящей книги является объединение информации, которая требуется инженеру сегодня и в ближайшем будущем для решения задачи выбора подходящего измерительного преобразователя. Поэтому в книге не делается попытки привести энциклопедические сведения об измерительных преобразователях, хотя автор и пытается охватить если и не все, то большинство из них.

Измерительные преобразователи имеют разные наименования в разных научных дисциплинах, поэтому одна из задач автора состояла в том, чтобы рационализировать многообразие наименований, определить категории преобразователей, которые были бы приемлемы для каждого, кто имеет дело с ними. Отсюда не следует, что любое частное название преобразователя является неверным (в частности, кто предпочтет назвать термистор температурно-чувствительным полупроводниковым резистивным прибором с отрицательным температурным ко-

эффицентом сопротивления? Хотя такое категоризованное определение преобразователя позволяет легче осуществить его выбор для решения определенной измерительной задачи).

Категории измерительных преобразователей, выбранные автором, определяются видом измеряемой физической величины. Конечно, зная, что, простые измерения определенных физических величин могут быть выполнены на основе разности или отношения некоторых исходных величин (например, скорость можно определить путем деления пройденного пути на затраченное для этого время), читателю сообщается в книге о возможностях измерительных преобразователей выполнять прямые или косвенные измерения. Последние необходимы для электронизации измерений, вернее, измерительных систем, в которых вычисляются значения физических величин.

Кейт Бриндли

ГЛАВА 1

ВВЕДЕНИЕ

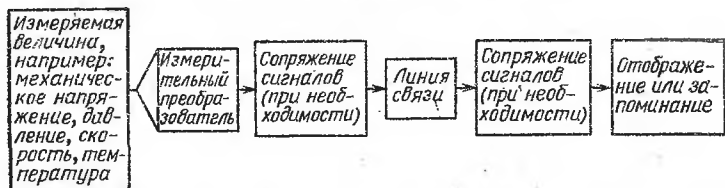
В точном смысле этого слова, определенном Оксфордским словарем, измерительный преобразователь является прибором, который преобразует изменение одной величины в изменение другой. В терминах электроники измерительный преобразователь определяется обычно как прибор, преобразующий неэлектрическую физическую величину (называемую измеряемой физической величиной) в электрический сигнал, или наоборот. Имеются, конечно, и исключения из этого правила.

Отсюда следует, что измерительные преобразователи используются в электронных системах, т.е. в технических устройствах с электрическим сигналом, отображающим результат измерений или наблюдений. С другой стороны, измерительный преобразователь может быть использован на выходе системы, чтобы, скажем, генерировать механическое движение в зависимости от электрического управляющего сигнала. Примером реализации преобразователей является справочная система, в которой микрофон (входной преобразователь) превращает звук (измеряемую физическую величину) в электрический сигнал. Последний усиливается, а затем поступает на громкоговоритель (выходной преобразователь), воспроизводящий звук существенно более громкий, нежели тот, который воспринимается микрофоном.

Довольно часто измеряемая величина согласно ее определению просто измеряется электронной системой, а полученный результат только отображается или запоминается. Однако в некоторых случаях измерения образуют входной сигнал управляющей схемы, которая служит либо для регулирования измеряемой величины относительно некоторого заранее установленного уровня, либо для управления переменной величиной в соответствии с измеряемой. Несмотря на очевидное частичное дублирование измерительных преобразователей в этих двух примерах, принято различать эти области использова-

ния преобразователей, называя их соответственно **контрольно-измерительное оборудование** и **управляющее**. В свою очередь, эти две области подразделяются на **теlemetryческое контрольно-измерительное оборудование** (в котором измерительные системы используются совместно с радиолиниями связи между преобразователем и устройствами отображения информации), **химический анализ** (при котором система используется для того, чтобы определить и отобразить относительное содержание составляющих смесь веществ), **процесс управления** (в котором производственный процесс, например прокат стали, контролируется и управляется) и т. д.

На рис. 1.1, а представлены основные составляющие типичной контрольно-измерительной системы. Безус-



а)



б)

Опорный сигнал, соответствующий
желаемому уровню измеряемой величины

Рис. 1.1. Структурные схемы контрольно-измерительной (а) и управляющей (б) систем. Управляющие системы могут рассматриваться как контрольно-измерительные, дополненные управляющими схемами

ловно, не все они должны иметь место в каждом конкретном случае применения этих систем. На рис. 1.1, б изображена в упрощенном виде типовая система управления. В сущности, часть системы управления является контрольно-измерительной системой. Таким образом, в интересах настоящей междисциплинарной книги измерительные преобразователи и схемы сопряжения их с другим оборудованием систем (интерфейсы) следует рассматривать с общих позиций, хотя в дальнейшем будут сделаны ссылки на конкретные области их использования.

Рассматривая рис. 1.1, следует остановиться на следующих главных моментах.

Измеряемая величина — это подлежащая измерению физическая величина, например: ускорение, перемещение, сила, расход, уровень, положение, давление, механическое напряжение, температура, скорость и т.п. В некоторых случаях измеряемой может быть и электрическая величина, такая, как ток, напряжение или частота, которая преобразуется в электрический сигнал, пригодный для использования в других частях системы. При этом измерительный преобразователь является электрическим преобразующим элементом.

Входной преобразователь, преобразующий измеряемую величину в электрический сигнал, — это прибор, пригодный для использования в других частях системы. Правда, хотя входные преобразователи генерируют электрический выход, существуют, однако, среди них и такие, которые имеют другую природу выходного сигнала, например давление воздуха, но таких преобразователей немного и они здесь не рассматриваются. Преобразователи с неэлектрическим выходом применяются в качестве чувствительных элементов измерительных преобразователей или служат для превращения неэлектрического сигнала в электрический. Все функции преобразователей являются аналоговыми, поэтому в общем случае (за некоторыми исключениями) их сигналы также аналоговые.

Линии связи — это линии между входным преобразователем и другой частью системы. Таких линий в строгом смысле может иногда и не быть, если, скажем, входной преобразователь размещается в нескольких сантиметрах от другой части системы. Если же он располагается на другом расстоянии от системы, то должны

быть предприняты шаги к тому, чтобы линии связи не влияли либо слабо влияли на эффективность работы системы.

Там, где в системе имеются существенные линии связи, требуется один или более каскадов сопряжения сигналов, чтобы малый выходной сигнал входного преобразователя усилить, подвергнуть аналого-цифровому преобразованию, фильтрации, модуляции и т. п. Это необходимо для того, чтобы информация, выдаваемая первичным преобразователем, не терялась при передаче ее к другим частям системы. Такие каскады могут включать в себя и схемы обработки сигнала, в которых содержащиеся в сигнале входного преобразователя данные подвергаются цифровой обработке, а результирующий сигнал или результаты вычислений могут быть отображены на дисплее, запомнены или использованы в целях управления. Сопряжение сигналов может осуществляться в нескольких точках системы.

В некоторых случаях довольно сложно сделать заключение о том, где в системе аналоговые сигналы преобразователей становятся данными. Поэтому часто невозможно различать каскады формирования аналогового сигнала и обработки данных. К счастью, это различие является довольно значительным.

Отображающие или запоминающие приборы — это приборы, которые индицируют текущее значение измеряемой величины для удобства работы оператора системы или запоминают соответствующую информацию для ее последующего использования.

В случае управляющей системы (рис. 1.1, б) применяются некоторые виды **компарирующих приборов**, предназначенных для сравнения обрабатываемых данных с некоторыми опорными значениями и получения разностного сигнала.

Работающий по разностному сигналу выходной преобразователь используется для управления измеряемой величиной.

Безусловно, приведенные на рис. 1.1 примеры систем содержат не все типы каскадов формирования и обработки сигналов и не отражают всех режимов работы контрольно-измерительных и управляющих систем.

Вообще говоря, принципы работы входных и выходных преобразователей довольно просты. Конечно, режимы их работы существенно отличаются друг от дру-

га — входные преобразователи обычно используются для преобразования изменений измеряемой величины в слабый электрический сигнал, а выходные преобразователи преобразуют мощный сигнал в сильное перемещение. По этой причине следует рассматривать два различных типа приборов. В книге речь идет о входных преобразователях, которые являются воспринимающими элементами электронных систем.

Терминология

Прежде чем приступить к изучению преобразователей, необходимо пояснить некоторые базовые понятия. В самом деле, термин преобразователь не полностью соответствует тому средству, которое он определяет. Некоторые инженеры, например, понимают под термином «преобразователь» прибор, который превращает электрический сигнал в другую физическую величину, т.е. считают его *выходным преобразователем*.

Иногда тот факт, что входной преобразователь должен откуда-то получать энергию, чтобы осуществлять процесс преобразования (либо непосредственно от самой измеряемой величины, либо от внешнего источника), помогает определить тип прибора. Например, входной преобразователь, получающий энергию от измеряемой величины, часто называют **пассивным преобразователем**, хотя, строго говоря, он должен бы именоваться чувствительным элементом (датчиком). Надо заметить, что термин *датчик* часто употребляется как синоним более общего термина *преобразователь*. Следуя этому принципу, **активным преобразователем** назовем такой, который получает энергию от внешнего источника. Различают еще **преобразователь обратной связи**, который используется в цепи обратной связи управляющей системы для измерения сигнала, противоположного по знаку входному сигналу. Таким образом, этот преобразователь применяется для балансировки управляющей системы, а не для непосредственного измерения физической величины.

Конечно, одного наименования для рассматриваемых средств недостаточно и преобразователи в конкретных дисциплинах имеют и другие названия. Очень часто, правда, они совпадают и становятся междисциплинарными. Такие, например, названия, как **трансмисмиттер**, **датчик**,

детектор, ячейка, измеритель, чувствительный элемент, зонд, а также слова, имеющие окончания *метр* (*мер*), а именно: акселерометр, расходомер, тахометр, являются общими и более или менее точными. В дальнейшем будем называть класс описываемых преобразователей и считать их входными преобразователями, помня о том, что конкретный прибор обладает своим названием, которое поясняет его функции, когда это требуется. Далее под преобразователем будем понимать входной преобразователь, а другой тип прибора назовем выходным преобразователем. Это является отражением того факта, что входных преобразователей существенно больше, чем выходных.

Точность измерений, характеризующая близость измеренного значения физической величины к его действительному значению, обычно оценивается погрешностью, т.е. максимально возможной разностью между измеренным и действительным значениями. Например, линейка длиной 300 мм может иметь погрешность, скажем, ± 1 мм. Это значит, что сама линейка имеет действительную длину между 299 и 301 мм. Она может быть точно равна 300 мм, но может и отличаться от этого значения. Поэтому любое измерение, сделанное с помощью этой линейки, будет выполнено с максимально возможной погрешностью ± 1 мм. Иногда погрешность выражается в процентах. В нашем случае погрешность линейки составляет $\pm 0,33\%$. В специальных случаях погрешность выражается в процентах по отношению к полной шкале, т.е. в процентах максимально возможного отсчета. Погрешность зависит от свойств преобразователя и типа используемого оборудования. Источником погрешности является также и оператор. Точность измерения определяется множеством причин, основные из которых будут рассмотрены ниже.

Связанной с точностью и часто ошибочно принимаемой за нее является разрешающая способность системы, характеризующая наибольшую точность, с которой осуществляются измерения. Возвращаясь к примеру с линейкой, очевидно, что если она проградуирована в миллиметрах, то легко интерполировать отсчет между двумя миллиметровыми отметками, что дает разрешение в 0,5 мм. Конечно, важно помнить о том, что хотя разрешающая способность может быть меньше, чем присущая преобразователю погрешность, это вовсе не означает, что

отсчет имеет малую погрешность. Общая погрешность будет, безусловно, больше.

Чувствительность, которую называют иногда масштабным коэффициентом преобразователя, есть отношение изменения его выходного сигнала к изменению на входе. Для линейного преобразователя, скажем, входного преобразователя, напряжение на выходе которого изменяется по линейному закону от температуры, чувствительность может быть просто определена делением общего диапазона выходного напряжения на общий входной диапазон. В качестве примера предположим, что диапазон изменения выходного напряжения преобразователя составляет от 0 до 10 В, а диапазон изменения температуры на входе — от 0 до 100 °С, тогда чувствительность равна

$$\frac{10}{100} = 0,1 \text{ В} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Одним из важнейших параметров преобразователя является линейность его характеристики, которая может влиять на точность измерения. Рекомендуется использовать преобразователи с линейной характеристикой (рис. 1.2, а), поскольку соединенные с преобразователем схемы формирования сигнала также являются линейными и, следовательно, весьма дешевыми при проектировании и изготовлении. Если же преобразователь является существенно нелинейным (рис. 1.2, б), то можно применить линеаризирующую схему формирования

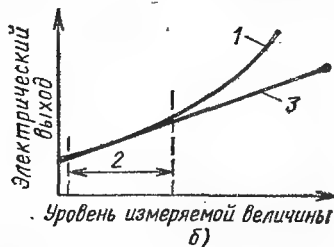
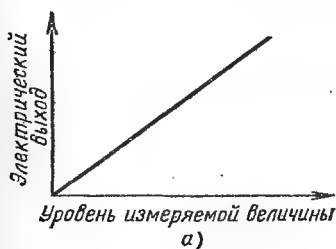


Рис. 1.2. Линейные и нелинейные характеристики преобразователей:

а — линейный преобразователь; б — нелинейный преобразователь. (Нелинейный преобразователь часто используется в ограниченной части общего диапазона, чтобы получить приблизительно линейную характеристику); 1 — реальная характеристика нелинейного преобразователя; 2 — линейная область выходного сигнала; 3 — линейная характеристика, которая аппроксимирует действительную реакцию преобразователя за счет использования ограниченной части диапазона

сигнала. Однако этого лучше не делать, поскольку такая схема очень дорого стоит. К счастью, использование лишь части общей характеристики нелинейного преобразователя позволяет гарантировать линейность отношения измеряемой и выходной величин.

С другой стороны, линейный преобразователь не рекомендуется использовать, когда измеряемая величина изменяется нелинейным образом. В таком случае линейный преобразователь будет лишь отражать нелинейное изменение измеряемой величины в своем выходном сигнале.

Линейный преобразователь может работать и вне своего обычного диапазона, но он имеет предел, при достижении которого выходной сигнал резко падает либо насыщается, когда измеряемая величина выходит за границы полной шкалы значений. Это также приводит к возникновению нелинейности.

В некоторых случаях отдается предпочтение высокой нелинейности характеристик. Скажем, в преобразователе, используемом для контроля выхлопных газов автомобиля, желательно иметь один выходной сигнал, соответствующий допустимому составу выхлопных газов, и совершенно другой, когда состав выхлопных газов неудовлетворительный. Как правило, один сигнал соответствует уровню логического 0, а другой — логической 1. В этом случае преобразователь функционирует как переключатель сигналов, имеющих два уровня.

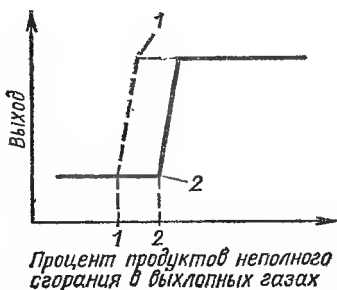
Рассмотрим еще одну характеристику преобразователя — гистерезис. Обращаясь вновь к преобразователю для контроля выхлопных газов автомобиля, заметим, что точное положение точки, в которой выходной сигнал переходит из одного состояния к другому, может меняться в зависимости от того, увеличивается или уменьшается выхлоп газов. На рис. 1.3 показана возможная характеристика преобразователя с гистерезисом.

При увеличении концентрации продуктов неполного сгорания в выхлопных газах преобразователь не меняет своего выхода, пока эта концентрация не превысит 2 %. Когда же концентрация продуктов неполного сгорания в выхлопных газах уменьшается, преобразователь не меняет своего выхода до тех пор, пока эта концентрация не снизится до 1 %. В общем случае стремятся к тому, чтобы эффект гистерезиса был как можно меньшим.

Проанализируем еще одну характеристику преобразователя — повторяемость значений его выходного сигнала. Выходной сигнал в идеальном случае должен быть постоянным, когда измеряемая величина не изменяется. В некоторых случаях, обычно если преобразователь имеет большой гистерезис, выходной сигнал может быть разным в зависимости от направления изменения измеряемой величины.

Рис. 1.3. Гистерезис в измерительном преобразователе:

1 — точка изменения состояния преобразователя при уменьшении процента продуктов неполного сгорания; 2 — точка изменения состояния преобразователя при увеличении процента продуктов неполного сгорания



Другим фактором, связанным с точностью преобразователя, является время отклика, которое равно времени установления выходного сигнала в ответ на изменение измеряемой величины. Мгновенное или ступенчатое изменение измеряемой величины может не вызывать одновременного соответствующего изменения выходного сигнала, если реакция преобразователя на изменение измеряемой величины происходит с большим запаздыванием.

В то же время такой преобразователь может иметь достаточно малую погрешность, если изменение измеряемой величины происходит медленно либо не происходит вообще. Присущая преобразователю инертность означает, что его нельзя использовать для измерения входной величины с быстроизменяющейся флуктуацией. Правда отсюда вовсе не следует, что каждый преобразователь должен иметь время отклика меньше, чем продолжительность изменений измеряемой величины.

В случае, например, преобразователя, предназначенного для измерения уровня топлива в автомобиле, быстрая реакция преобразователя является скорее его недостатком, поскольку водителю нежелательно видеть колебания стрелки указателя топлива от одной крайней

отметки до другой (от полного до пустого бака), когда автомобиль движется по неровной дороге и топливо плескается в баке. Существуют и другие примеры преобразователей, которые должны иметь и не очень быструю, и не очень медленную реакцию, а именно такую, которая в условиях конкретного применения обеспечивает наилучшую точность измерений.

Полоса преобразователя — это характеристика, напрямую связанная с временем отклика. Изменение измеряемой величины можно описать совокупностью частотных составляющих: в соответствии с преобразованием Фурье любой сигнал можно представить совокупностью синусоидальных составляющих, имеющих различные частоты и амплитуды. Чем быстрее изменяется измеряемая величина, тем большая частота у составляющих и шире спектр частот выходного сигнала. Если полоса частот преобразователя относительно мала, то присутствующие в измеряемой величине высокие частотные составляющие в выходном сигнале исчезают и реакция преобразователя становится медленной, а время отклика большим.

Внешние условия

Кроме учета всех факторов, связанных с изготовлением преобразователей, инженер решает задачу выбора преобразователя для конкретного применения, условия которого играют важную роль в этом решении. Где преобразователь предполагается использовать? Какие условия надо учитывать при его работе?

Все это крайне важно при выборе преобразователей, поскольку внешние условия, в которых он находится, могут в сильной степени влиять на его работу. Внешние условия инженер должен учитывать для того, чтобы преобразователь точно выполнял свои функции не только в момент ввода в эксплуатацию, но и в течение всего срока службы измерительной системы.

Вообще говоря, влияние внешних условий на преобразователь и связанную с ним измерительную систему может быть трех видов. Во-первых, непосредственное воздействие внешних условий на сам преобразователь. Возможно, что температура окружающей среды преобразователя давления является чрезмерно высокой и вызывает плавление деталей прибора или преобразова-

тель, измеряющий температуру двигателя, не выдерживает вибраций, возникающих при нормальной работе последнего.

Во-вторых, если известно, что преобразователь непосредственно под действием внешних условий не разрушается, то надо выяснить, сохраняет ли он точность в течение длительного времени. Может оказаться, что у прибора под действием внешних условий ухудшаются с течением времени точностные характеристики до уровня, который был неприемлем в момент его установки в измерительную систему. Если преобразователь ухудшает свои точностные характеристики, его нужно заменить на новый, однако эта проблема является особой и здесь не рассматривается.

В-третьих, влияние внешних условий на линии связи между измерительной системой и преобразователем, хотя при этом они влияют на преобразователь косвенно. Могут ли эти связи противостоять внешним условиям? Могут ли внешние условия привести к нарушению сигнала?

Конструкция преобразователя

Любой преобразователь можно рассматривать как устройство, структурная схема которого представлена на рис. 1.4. Здесь чувствительный элемент воспринимает

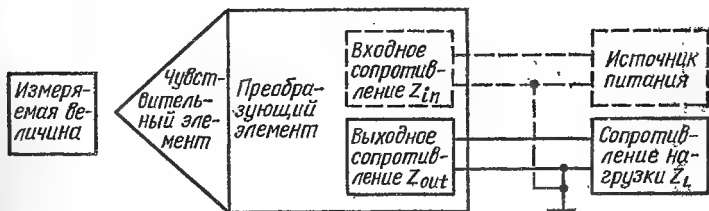


Рис. 1.4. Структурная схема измерительного преобразователя, включающая в себя элементы, общие для всех типов преобразователей. Показанные в пунктирных линиях элементы могут в некоторых преобразователях отсутствовать

измеряемое свойство объекта и преобразует его в другую физическую величину. Затем преобразующий элемент преобразует эту физическую величину в электрический сигнал, значение которого отражает уровень из-

меряемого свойства объекта. Другими возможными частями измерительного преобразователя являются схемы формирования сигнала и питания (см. гл. 3).

Чувствительный элемент преобразует измеряемую часть физической величины в такую физическую величину, которая может быть воспринята и измерена преоб-

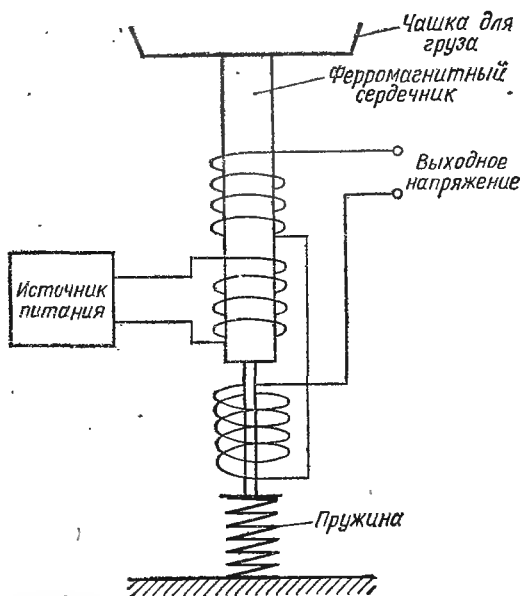


Рис. 1.5. Первичный измерительный преобразователь, в котором используется дифференциальный трансформатор с линейно изменяющимся выходом и пружина для измерения массы

разующим элементом. С этой точки зрения и сам чувствительный элемент можно рассматривать, строго говоря, как преобразователь.

На рис. 1.5 показан принцип действия хорошо известного прибора — дифференциального трансформатора с линейно изменяющимся выходным сигналом для измерения массы. Чувствительным элементом этого прибора, т. е. элементом, который преобразует измеряемую величину (массу) в другую физическую величину (положение), является пружина. Она сжимается, когда груз устанавливается на крышку преобразователя, за счет

чего изменяется положение сердечника трансформатора. В качестве преобразующего элемента здесь используется трансформатор с линейно изменяющимся выходом, который преобразует положение сердечника в электрический сигнал с амплитудой, пропорциональной массе груза.

Конечно, не всегда можно так легко, как в приведенном выше примере, разделить чувствительный и преобразующий элементы первичного измерительного преобразователя.

Аналоговый или цифровой?

При включении преобразователей в измерительные системы возникает проблема их согласования. Все преобразователи по своей сущности являются чисто аналоговыми устройствами, главным образом в силу того, что пока не известны физические явления, позволяющие преобразователю непосредственно представлять измеряемую величину в цифровом коде на выходе. Для аналоговых систем подобная ситуация обладает рядом недостатков. Однако она становится еще более сложной для цифровых систем, которых выпускается все больше. В этой ситуации аналоговый выходной сигнал первичного измерительного преобразователя должен иметь форму, пригодную для его использования в цифровой системе.

В электронной системе существуют три вида сигналов:

1) аналоговый сигнал, являющийся электрическим представлением или аналогом (током или напряжением) исходного измеряемого параметра;

2) цифровой сигнал, в котором функция, например частота, используется для представления значения исходного параметра;

3) кодированный цифровой сигнал, в котором параллельный цифровой сигнал, например, разрядностью в 8 бит, представляет значение исходного параметра.

Эти виды сигналов обычно определяют типы первичных измерительных преобразователей. Известны преобразователи, выход которых является чисто электронным аналогом измеряемой величины. Другие преобразователи представляют измеряемую величину в цифровой форме, а третьи — в виде цифрового кода. Следует подчеркнуть, что лишь несколько принципов действия приме-

нимы для преобразователей всех перечисленных выше типов. Однако с помощью электроники можно преобразовать сигнал одного вида в другой.

План книги и краткие сведения о ее содержании

Существует огромное число всевозможных первичных измерительных преобразователей, однако, к счастью, в их основе лежит ограниченное число физических принципов. Обсуждая эти принципы вначале (гл. 2), я надеюсь дать читателю основное представление о главных категориях преобразователей до того, как перейти к рассмотрению конкретных приборов. При обсуждении принципов действия измерительных преобразователей (гл. 3) основное внимание сосредоточивается на их применении. Это рассмотрение детализируется лишь в тех случаях, когда описываются конкретные типы преобразователей (гл. 4—8).

Основные группы измеряемых величин и связанных с ними свойств, которые можно считать измеряемыми величинами, обсуждаются подробно в следующем порядке: температурные измерения, измерения в твердых телах, измерения в жидкостях, акустические и оптические измерения, химические измерения.

Одна глава посвящается каждой основной группе измеряемых величин. В каждой главе описываются используемые методы измерений и базовые конструкции измерительных преобразователей в соответствии с основными принципами их действия, изложенными в гл. 2. Предполагается, что читатель имеет фундаментальные знания об измеряемых величинах, поэтому относительно мало внимания уделяется принципам их измерений. Вводятся описания новых типов измерительных преобразователей, и если некоторые типы преобразователей не описаны в книге, то это потому, что к моменту ее написания не было сведений о них.

Наконец, в гл. 9 обсуждаются интерфейсы и соединения измерительных преобразователей, формирование их сигналов, аналого-цифровое преобразование и др.

Книга не является руководством по использованию измерительных преобразователей в конкретных областях применения. Однако она поможет инженерам произвести выбор конкретного типа преобразователей.

ПРИНЦИПЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В каждом приборе, рассматриваемом в книге, преобразующий элемент основан на определенном физическом принципе, который связан с электрическими характеристиками устройства так, что изменение измеряемой величины влечет за собой изменение этих характеристик. Изменения в электрических характеристиках создает электрический сигнал, зависящий от измеряемой величины.

Хотя на рынке продаются тысячи измерительных преобразователей, принципов действия, на которых они основаны, существует относительно немного. Поэтому можно рассмотреть эти принципы достаточно подробно. Все используемые в преобразователях основные принципы можно объединить в восемь категорий, которые описаны ниже.

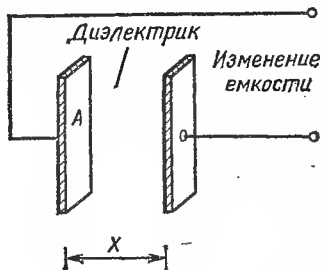
Емкостные преобразователи

Емкостные преобразующие элементы превращают изменения измеряемой величины в изменения емкости. Конденсатор формируется из двух пластин, разделенных слоем диэлектрика, а его емкость определяется из следующего выражения:

$$C = \epsilon \frac{A}{x},$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика; A — площадь поверхности каждой пластины; x — расстояние между пластинами.

Рис. 2.1. Емкостный измерительный преобразователь



Из этого соотношения следует, что емкость зависит от диэлектрической проницаемости, площади поверхности пластин и расстояния между ними (рис. 2.1).

Емкость такого преобразователя обычно измеряется следующим образом:

- 1) с помощью мостовой схемы переменного тока, в которой преобразователь образует одно плечо моста;
- 2) с помощью мультивибратора, в котором конденсатор в цепи определяет частоту колебаний.

Пьезоэлектрические преобразователи

Одним из емкостных принципов преобразования, требующим специального рассмотрения, является **пьезоэлектрический эффект** (рис. 2.2), при котором изменение

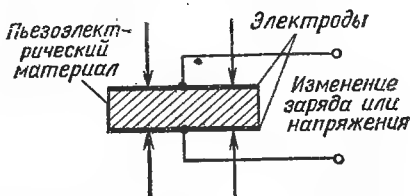


Рис. 2.2. Пьезоэлектрический преобразователь

измеряемой величины превращается в изменение электростатического заряда или напряжения, возникающих в некоторых материалах при их механическом напряжении. Напряжение обычно образуется под действием сил сжатия, растяжения или изгиба, которые являются измеряемой величиной и воздействуют на чувствительный элемент либо непосредственно, либо с помощью некоторой механической связи.

Чтобы воспринять изменение заряда или напряжения, к пьезоэлектрическому материалу подсоединяют две металлические пластинки, которые фактически образуют пластины конденсатора, емкость которого определяется в виде

$$C = \frac{Q}{V},$$

где Q — заряд; V — напряжение.

В качестве пьезоэлектрического материала, применя-

емого в конструкции такого преобразователя, используются: 1) природные кристаллы, такие, как кварц или роцеллевая соль; 2) синтетические кристаллы, например сульфат лития; 3) поляризованная ферромагнитная керамика, например титанат бария.

Электромагнитные преобразователи

Электродвижущая сила (ЭДС) генерируется вдоль проводника, когда его пересекает переменное магнитное поле. И, наоборот, когда проводник движется через магнитное поле, вдоль него генерируется ЭДС (рис. 2.3), определяемая из следующего соотношения:

$$E = - \frac{Q(N\Phi)}{dt},$$

где $d(N\Phi)/dt$ — скорость изменения потокосцепления.

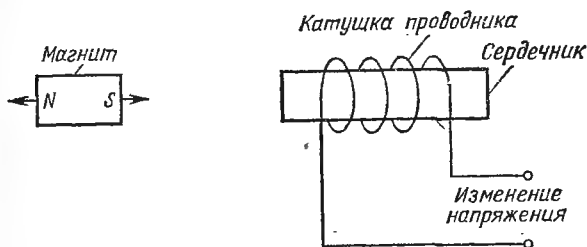


Рис. 2.3. Электромагнитное преобразование

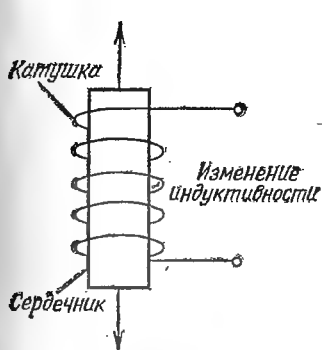


Рис. 2.4. Индуктивное преобразование

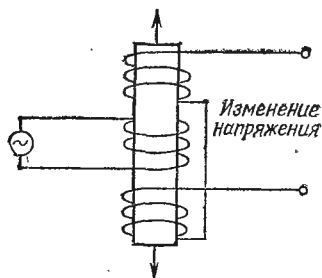


Рис. 2.5. Преобразование магнитного сопротивления, используемое в дифференциальном трансформаторе с линейно-изменяющимся выходом

Индуктивное преобразование показано на рис. 2.4, где самоиндукция катушки меняется в соответствии с изменением измеряемой величины. Изменение индуктивности может быть осуществлено путем движения ферромагнитного сердечника внутри катушки либо путем внесения внешнего изменяющегося потока в катушку с неподвижным сердечником.

Преобразование магнитного сопротивления показано на рис. 2.5, на котором цепочка сопротивления между двумя или более катушками (или отдельными частями одной или нескольких катушек) изменяется в зависимости от вариаций измеряемой величины. Когда к системе катушек прикладывается переменный ток, тогда изменение измеряемой величины трансформируется в изменение выходного напряжения.

Электромеханические преобразователи

Электромеханические преобразователи выпускаются в разном исполнении, но все они выполняются в форме механического контактного устройства, работающего под действием изменяющейся физической величины, измерение которой и осуществляется. Обычно контакты имеют простую форму и работают в дискретном режиме, как, например, биметаллический выключатель (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Биметаллический элемент, работающий как электромеханический преобразователь

Когда значение измеряемой величины превышает точку переключения, контакт размыкается или замыкается, вследствие этого в замкнутой или разомкнутой электрической цепи формируется выходной сигнал преобразователя.

Электромеханические преобразователи являются, как правило, цифровыми (дискретными), поскольку их контакты могут быть лишь в двух положениях и представляют собой элемент включен/выключен.

Ионизационные преобразователи

Ионизационные преобразующие элементы превращают изменение измеряемой величины в изменение тока ионизации, который протекает, например, через жидкость, расположенную между двумя электродами (рис. 2.7). Типичным примером использования ионизационного принципа является прибор для измерения кислотности раствора. Степень кислотности раствора определяется

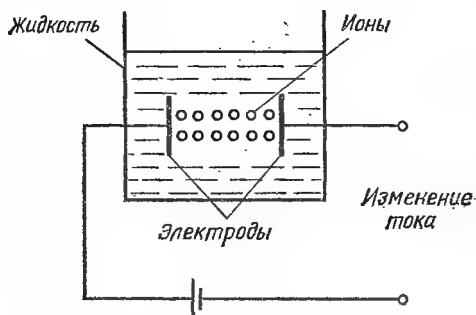


Рис. 2.7. Ионизационное преобразование, при котором ионы мигрируют в жидкости к электродам и действуют как переносчики зарядов, вызывая тем самым электрический ток

концентрацией в нем положительно заряженных ионов водорода, называемой *водородным потенциалом* (известного больше в виде аббревиатуры pH). Причем

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+],$$

где $[\text{H}^+]$ — концентрация ионов водорода в граммах на литр.

Значение pH равно 0 для чисто кислотного раствора, 7 для нейтрального раствора (например, чистой воды) и 14 для чисто щелочного раствора.

Типичный pH-зонд имеет электроды, находящиеся в желатине с известным значением водородного потенциала. Они формируются специальной стеклянной мембраной, которая находится в контакте с раствором, значение pH которого измеряется. Разность потенциалов между двумя электродами отражает значение pH раствора (около 59 мВ на единицу pH).

Фотоэлектрические преобразователи

Фотоэлектрическими являются такие первичные измерительные преобразователи, которые реагируют на электромагнитное излучение, падающее на поверхность преобразующего элемента. Излучение может быть видимым, т.е. световым, а также иметь большую или меньшую длину волны и быть невидимым. Известны три основных типа фотоэлектрических преобразователей: два из них официально классифицируются как полупроводниковые приборы (фотоэлектрические и фотополупроводниковые). Они подробно рассмотрены ниже. Хотя фотоэлектрический преобразователь и не относится к полупроводниковым приборам, он тоже будет описан ниже.

Фотопроводящие преобразователи

Эти преобразователи превращают изменение измеряемой величины в изменение сопротивления используемого материала (рис. 2.8). Несмотря на то что используе-

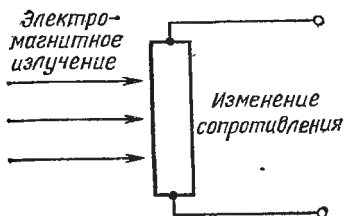


Рис. 2.8. Фотопроводящее преобразование

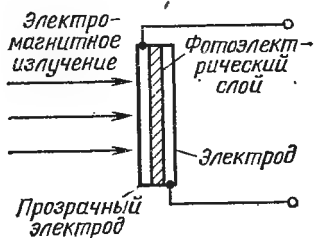


Рис. 2.9. Солнечный элемент как пример фотоэлектрического преобразования

мые материалы являются полупроводниковыми, фотопроводящие преобразователи не всегда являются полупроводниковыми приборами, поскольку они не имеют переходов между различными типами полупроводников. Такие преобразователи называются пассивными, т.е. нуждаются во внешнем питании. Зачастую их название характеризует тип используемого преобразования, например **светочувствительные резисторы**.

Сопротивление материала является функцией плот-

ности основных носителей заряда, и так как плотность увеличивается с возрастанием интенсивности излучения, то проводимость возрастает. Поскольку проводимость обратно пропорциональна сопротивлению, можно заключить, что сопротивление является обратной функцией интенсивности облучения. Значение сопротивления при полном облучении составляет в общем случае 100—200 Ом, а в полной темноте это сопротивление равняется мегаомам. В конструкции зависящих от света резисторов чаще всего используются такие материалы, как сульфид кадмия или селенид кадмия.

Солнечные элементы

Солнечные элементы представляют собой фотоэлектрические преобразователи, которые превращают излучаемую электромагнитную энергию в электрическую, т.е. изменение измеряемого значения излучения преобразуется в изменение выходного напряжения (рис. 2.9).

Конструкция преобразователя включает в себя слой фоточувствительного высокоомного материала, размещенного между двумя проводящими электродами. Один из электродов выполнен из прозрачного материала, через который проходит излучение и попадает на фоточувствительный материал. При полном освещении один элемент вырабатывает выходное напряжение между электродами около 0,5 В.

Резистивные преобразователи

Весьма большим классом измерительных преобразователей являются резистивные преобразователи, принцип действия которых основан на преобразовании значения измеряемой величины в изменение сопротивления. Последнее может быть вызвано различными эффектами в преобразующем элементе, например нагреванием или охлаждением, механическим напряжением, воздействием светового потока (как в фотопроводящих преобразователях), увлажнением, осушением, механическим перемещением контактной щетки реостата.

Если через резистивный материал во время изменения измеряемой величины протекает фиксированный ток, то результатом будет изменение напряжения вдоль ма-

териала, которое отражает изменение измеряемой величины.

Одним из вариантов резистивного преобразователя является **потенциометрический преобразователь**, в котором изменение измеряемой величины преобразуется в изменение отношения напряжений вследствие изменения положения контактной щетки на резистивном материале, запитываемом от внешнего источника (рис. 2.10). Определенный механический элемент преобразует изменение измеряемой величины в перемещение щетки.

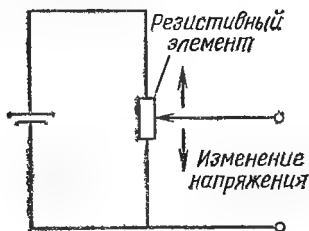


Рис. 2.10. Резистивное преобразование, при котором используется потенциометрическое устройство, вызывающее изменение выходного напряжения

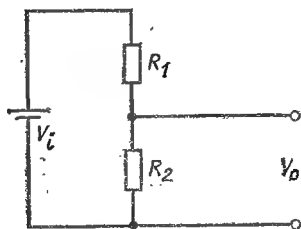


Рис. 2.11. Эквивалентная схема потенциометрического устройства, изображенного на рис. 2.10

Потенциометр, изображенный на рис. 2.10, можно представить в виде эквивалентной электрической схемы, как это сделано на рис. 2.11. Его выходное напряжение определяется выражением

$$V_0 = \frac{V_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

где V_1 — напряжение на входе.

Когда прикладываемое на вход прибора напряжение является постоянным и измеряемое значение определяется положением щетки потенциометра, тогда выходное напряжение есть непосредственно функция измеряемой величины.

В преобразователях могут использоваться потенциометрические устройства (с одним или несколькими сопротивлениями в схеме) либо они сами являются потенциометром. В последнем случае потенциометрический элемент будет переменным. Некоторые преобразователи

имеют непроволочные сопротивления, такие, как металлокерамическая подложка или проводящая пластиковая пленка. Встречаются потенциометры, в которых полный диапазон изменений положения щетки равен 270° , в то время как другие конструкции имеют диапазон в 10 или даже 20 полных оборотов (3600 или 7200°).

Мост Уитстона

Мост Уитстона образуется путем параллельного соединения двух потенциометрических устройств (рис. 2.12). Его можно использовать для высокоточных измерений сопротивления. Выходное напряжение моста Уитстона

$$V_0 = V_1 \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right).$$

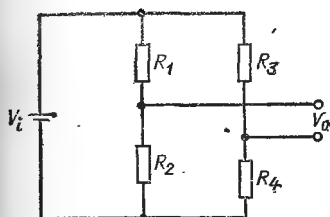


Рис. 2.12. Комбинация двух потенциометрических делителей, образующая мост Уитстона

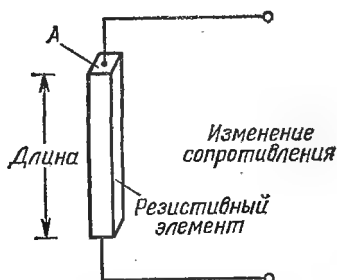


Рис. 2.13. Тензометрическое преобразование

При точной установке выходное напряжение моста Уитстона должно быть равно нулю, откуда следует, что

$$\frac{R_3/R_4}{1 + R_3/R_4} = \frac{R_1/R_2}{1 + R_1/R_2},$$

тогда получаем

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Тензодатчики

Поскольку сопротивление проводника определяется соотношением

$$R = \rho L/A,$$

где ρ — удельное сопротивление материала; L — длина; A — площадь поперечного сечения, то сопротивление может изменяться при любом колебании измеряемой величины, которая влияет на один или несколько входящих в это выражение аргументов.

Приведенная зависимость используется в тензодатчиках — преобразователях, которые превращают изменение прикладываемого усилия в изменение сопротивления (рис. 2.13). Как правило, такой преобразователь применяется вместе с мостом Уитстона, когда одно, два или даже все четыре плеча представляют собою тензодатчики, а выходное напряжение изменяется в ответ на вариации измеряемого усилия.

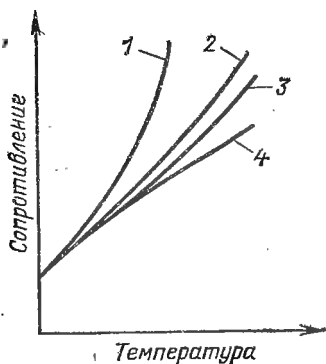


Рис. 2.14. Характеристики зависимости сопротивления некоторых металлов от температуры:

1 — никель; 2 — вольфрам; 3 — медь; 4 — платина

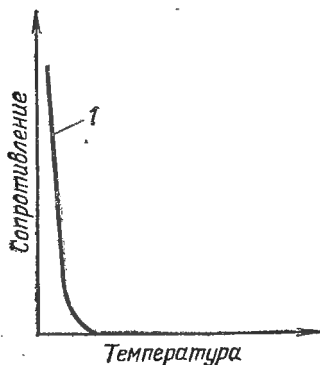


Рис. 2.15. Зависимость сопротивления типичного термистора от температуры:

1 — термистор

В тензодатчиках используются металлические преобразующие элементы, при приложении механической нагрузки к которым происходит изменение их длины и площади поперечного сечения, что приводит, в свою очередь, к изменению сопротивления. Некоторые материалы тензодатчиков, например полупроводниковые, проявляют пьезоэлектрический эффект, при котором приложенная к материалу нагрузка вызывает большое изменение его удельного сопротивления. Тензодатчики такого типа об-

ладают на два порядка большей чувствительностью, чем ранее рассмотренные.

В общем случае любой параметр, который воспроизводит движение или силу, может быть использован для создания тензометрических преобразователей.

Сопротивление иногда также изменяется при колебании температуры. Для металла это изменение имеет линейную зависимость

$$R = R_0(1 + \alpha T),$$

где R_0 — сопротивление при температуре 0°C ; T — температура, $^\circ\text{C}$; α — температурный коэффициент сопротивления.

Типовые зависимости сопротивления некоторых металлов от температуры показаны на рис. 2.14. Они свидетельствуют о высокой степени линейности связи между сопротивлением и температурой. Для создания температурных измерительных преобразователей такого типа обычно используется проволока из платины.

Термисторы

Другая основная группа чувствительных к температуре преобразователей, используемых в термометрических приборах, известна под названием термисторы. Они имеют весьма нелинейную характеристику, однако могут быть эффективно использованы в системах для измерения температуры. Сопротивление термистора определяется следующим выражением:

$$R_T = A \exp \frac{B}{T},$$

где R_T — сопротивление; A — постоянная, значение которой для разных материалов различно; B — характеристическая температура прибора; T — температура, К.

Типичная характеристика термистора представлена на рис. 2.15. Сопоставление характеристик резистивных преобразователей (рис. 2.14) с характеристиками термистора позволяет сделать выводы о том, что последние:

- 1) являются более крутыми, т. е. температурный коэффициент сопротивления у них существенно больше, чем в металлах, по крайней мере в основной части кривой;
- 2) падают с увеличением температуры, т. е. температурный коэффициент сопротивления у них отрицательный.

Термисторные преобразователи с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления известны больше как NTC-термисторы (negative temperature coefficient). Необходимо заметить, что существуют и термисторы с *положительным* коэффициентом сопротивления, которые обозначаются как PTC-термисторы (positive temperature coefficient). Последние чаще применяются не для измерения температуры, а, скажем, для предупреждения перегрева.

Другой и более удобной формулой для описания характеристики термистора в случае, когда известно его сопротивление R_1 при некоторой температуре T_1 , является выражение

$$R = R_1 \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right),$$

которое получается путем подстановки в ранее приведенную формулу следующего очевидного соотношения:

$$R_1 = A \exp \frac{B}{T_1}.$$

Термисторы существенно меньше по габаритам, чем металлические резистивные преобразователи, и поэтому они быстрее реагируют на изменение температуры. С другой стороны, небольшие размеры термисторов приводят к тому, что для их самонагрева требуется небольшой ток. Следовательно, можно считать, что ток не влияет на точность измерений.

Полупроводниковые преобразователи

Полупроводниковые приборы относятся к категории электронных компонентов, которые называются полупроводниками. Чистые или *беспримесные* полупроводники обычно не используются в этих приборах, но первоначально легированные примесями в полупроводниковую кристаллическую решетку они становятся *примесными* полупроводниками.

Примесные полупроводники легируются таким образом, чтобы обеспечить избыток электронов (полупроводники *n*-типа) или их недостаток (полупроводники *p*-типа). Наличие примесей в полупроводниковой кристаллической решетке определяет степень электропроводности решетки.

Одинокные слои n - или p -полупроводника не находят применения, и полупроводниковый материал становится полупроводниковым прибором только тогда, когда два или более слоев разных типов контактируют друг с другом. Простейший p — n -переход формирует выпрямительный прибор или диод. Вольт-амперная характеристика диода устанавливается согласно соотношению, известному как *уравнение Шокли* либо уравнение идеального диода, а именно:

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right],$$

где I_0 — ток насыщения (или ток утечки); q — заряд электрона; V — прикладываемое к диоду напряжение; k — постоянная Больцмана; T — температура, К.

Любое изменение измеряемой величины, которое вызывает изменение приведенного выше выражения, может быть, конечно, использовано для изменения тока, протекающего через переход. Например, диод иногда применяется в качестве преобразователя температуры, поскольку ток утечки полупроводника изменяется в функции температуры. Ток утечки кремния составляет примерно 25 нА при температуре 25 °С и увеличивается до 6,5 мА при температуре 150 °С.

Фотодетекторы

Полупроводниковые преобразователи, предназначенные для измерения изменений параметров светового излучения, называются **фотодетекторами**. **Фотоэлектрический преобразователь**, являющийся простейшим видом фотодетекторов, и представляет собой полупроводниковый диод. Существует несколько типов таких преобразователей. Один из основных среди них — **фотодиод**, в котором используется эффект облучения светом (видимым или, других длин волн) p — n -перехода с отрицательным смещением. При наличии облучения изменяется ток, протекающий через переход. Время отклика такого фотодиода составляет всего несколько наносекунд.

Для обеспечения более быстрой реакции на изменение параметров излучения разработаны PIN-диоды, в которых между слоями p - и n -типа имеется слой беспримесного полупроводника. Это повышает чувствительность

к световому излучению и одновременно уменьшает емкость перехода, благодаря чему диод быстрее реагирует на изменение уровня измеряемой величины.

Фототранзисторы

В целом ряде приборов фотодиоды используются вместе с усилителями для повышения чувствительности. Конечно, в обычном транзисторе (трехслойный полупроводниковый прибор $n-p-n$ - или $p-n-p$ -типа) содержится $p-n$ -переход с отрицательным смещением, и прибор способен усиливать ток, т. е. он обладает всеми необходимыми свойствами фотодиода и усилителя. И все это в одном приборе.

Фототранзистор отличается от обычного полупроводникового триода тем, что он выполняется в прозрачном корпусе, который пропускает световое излучение. Свет, падающий на переход коллектор—база фототранзистора ($p-n$ -переход с отрицательным смещением), вызывает в базе фототок, который усиливается с коэффициентом усиления транзистора, что приводит к весьма большому току эмиттера.

Ток эмиттера фототранзистора определяется из следующего соотношения:

$$I_E = (1 + h_{FE}) I_F$$

где h_{FE} — коэффициент усиления транзистора по постоянному току; I_F — фототок базы.

Для достижения более высокого усиления используют фотодетекторы Дарлингтона, содержащие в себе фототранзистор и транзистор с высоким коэффициентом усиления, работающие в режиме пары Дарлингтона. Оба транзистора размещаются в одном корпусе.

Поскольку фотодетекторы являются полупроводниковыми приборами, их ток насыщения зависит от температуры. Поэтому при отсутствии светового излучения в них протекает так называемый **темновой ток**, ограничивающий возможности прибора по измерению низких уровней светового излучения.

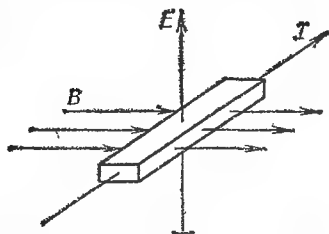
Эффект Холла

Когда проводник с протекающим по нему током помещается в магнитное поле так, что направление тока оказывается перпендикулярным магнитным силовым ли-

ниям, то образуется поперечное электрическое поле, пропорциональное произведению плотности магнитного потока и силе электрического тока. Этот эффект возникает в проводниках, однако наиболее существен он в полупроводниках, где известен под названием **эффекта Холла**.

На рис. 2.16 показана полупроводниковая пластина, к которой приложено магнитное поле с индукцией B , перпендикулярное протекающему через нее току I , и возник-

Рис. 2.16. Иллюстрация эффекта Холла, при котором возникающее электрическое поле перпендикулярно прикладываемому к полупроводнику магнитному полю и протекающему по нему току



кающее при этом электрическое поле с напряженностью E . Отношение между магнитной индукцией, током и напряженностью определяется следующим образом:

$$E = -R_H(I \cdot B),$$

где $R_H = \frac{1}{ne}$ — коэффициент Холла; n — число зарядов,

протекающих через единицу объема и образующих электрический ток в проводнике или полупроводнике; e — заряд носителя зарядов.

Эффект Холла используется во многих типах преобразователей, предназначенных для измерения магнитного поля, а также в бесконтактных переключающих приборах.

Термоэлектрические преобразователи

Термоэлектрические преобразующие элементы превращают изменение измеряемой величины (температуры) в изменение тока, возникающего вследствие разности температур на спае двух разнородных материалов, в котором возникает **эффект Зеебека (Seebeck)** (рис. 2.17).

Термоэлектрический преобразователь больше известен под названием **термопары**, в которой зонд состоит из двух спаев, один из которых размещается в точке, где произ-

водится измерение температуры, а второй — в точке опорной температуры (рис. 2.18). Разность потенциалов $V_1 - V_2$, которая образуется на двух спаях (известная как контактные потенциалы), зависит от температуры спаев и измеряется вольтметром. Таким образом, показания вольтметра отображают разность температур между спаями.

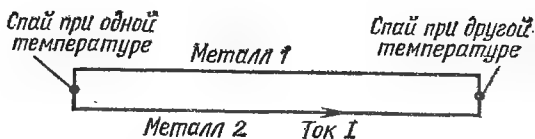


Рис. 2.17. Эффект Зеебека, при котором в схеме, состоящей из спаев двух разнородных металлов, находящихся при разной температуре, возникает ток

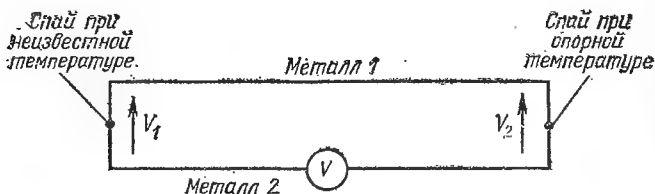


Рис. 2.18. Принцип действия термопары

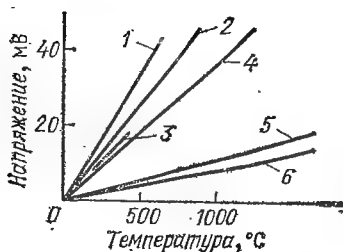


Рис. 2.19. Типичные зависимости напряжения от разности температуры для термопар, спай которых выполнены из разных материалов:

- 1 — никель—хром/константан (тип E); 2 — железо/константан (тип J); 3 — медь/константан (тип T); 4 — никель—хром/никель—марганец—алюминий—кремний (тип K); 5 — платина—родий/платина (тип R); 6 — платина—родий/платина (тип S)

На рис. 2.19 показаны кривые, характеризующие зависимость напряжения от разности температур для ряда типичных материалов, из которых образуются спай термопар. Хотя эти зависимости кажутся линейными, подробные исследования показывают, что это не совсем так.

На практике не так просто достигнуть необходимой

точности температурных измерений с помощью термопар, как это может показаться из приведенных выше рассуждений, поскольку соединение вольтметра с термоэлектрической схемой само по себе образует новый спай в схеме. Кроме того, объект, температура которого измеряется, может находиться на некотором расстоянии от вольтметра, что затрудняет процесс формирования стабильной опорной температуры.

ГЛАВА 3

ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОНСТРУКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Измерительные преобразователи обычно проектируются так, чтобы измерять только одну физическую величину, поэтому они и реагируют только на нее. Например, термистор проектируется для измерения изменений температуры. Конечно, зачастую и другие измеряемые величины могут быть определены по известным соотношениям этих величин с величинами, непосредственно воспринимаемыми преобразователями; скажем, скорость можно вычислить по результатам измерения перемещения путем деления перемещения на время, за которое это перемещение произошло.

Поэтому функции, для выполнения которых используется преобразователь, зависят от структуры измерительной системы и не всегда определяются внутренними свойствами прибора. Тем не менее внутренние свойства преобразователей имеют важное значение и их следует учитывать при любых серьезных исследованиях.

Характеристики преобразователей

Диапазон преобразователя определяется верхней и нижней границами значений измеряемой величины. Односторонний диапазон характеризуется тем, что измеряемыми являются либо только положительные, либо только отрицательные значения физической величины (скажем, от 0 до 10 кг). Причем односторонний диапазон может быть расположен так, что нулевое значение физической величины измерить не удастся (например, от 120 до 900 об/мин). При двустороннем диапазоне определяются

как положительные, так и отрицательные значения физической величины (например, $\pm 60^\circ\text{C}$ — симметричный диапазон; от -20 до $+100^\circ\text{C}$ — несимметричный диапазон).

В терминах «черного ящика» (рис. 3.1) измерительный преобразователь является довольно простым устройством. Он имеет чувствительный элемент, воспринимающий непосредственно измеряемую величину, преобразующий элемент (его работа основана на одном из принципов преобразования, описанных в гл. 2), генерирующий некоторый электрический выходной сигнал в зависимости от значения измеряемой величины, и, возможно, некоторые схемы возбуждения (и/или формирования сигнала).

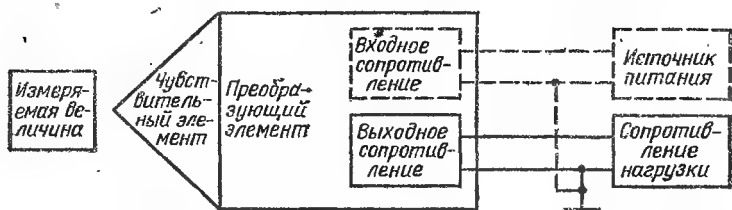


Рис. 3.1. Повторение рис. 1.4, иллюстрирующее в виде структурной схемы конструкцию измерительного преобразователя

Преобразователь подключается к источнику питания (который может быть внутренним либо его может не быть вообще) и нагрузке. Питание требуется в преобразователях (за исключением пассивных преобразователей) для обеспечения их точной работы и может обеспечиваться либо источником напряжения, либо источником тока.

Сопротивление источника питания Z_s называется сопротивлением источника; сопротивление преобразователя Z_{in} по отношению к источнику питания выступает в качестве входного сопротивления. Сопротивление кабеля между источником питания и преобразователем всегда рассматривается как часть сопротивления источника.

Выходное сопротивление Z_{out} — это сопротивление на выходных клеммах преобразователя. Сопротивление, прикладываемое к выходным клеммам преобразователя, является сопротивлением нагрузки преобразователя Z_L . Любое сопротивление кабеля между преобразователем и нагрузкой всегда рассматривается как часть сопротивления

нагрузки. Согласование преобразователя с измерительной системой осуществляется путем тщательного учета рассмотренных сопротивлений.

Источник питания и выходной сигнал электрически полностью изолированы друг от друга или имеют общий провод.

Обратные провода обычно электрически изолированы от корпуса преобразователя и могут быть заземлены либо являются «плавающими» в зависимости от устройства заземления, используемого в системе.

Внешний вид измерительного прибора зависит от типа используемого в нем преобразующего элемента. Поскольку последний размещается в корпусе, следует принимать во внимание его конструкцию. Она должна обеспечивать:

- 1) установку и управление работой прибора;
- 2) защиту от повреждений при воздействии на прибор измеряемой величины и внешних условий;
- 3) правильный интерфейс между преобразователем и измерительной системой.

Выбор преобразователя, удовлетворяющего требованиям стандартов на электрические характеристики, и определение соответствия механических свойств выбранного преобразователя перечисленным выше требованиям должен производить инженер, решая вопрос о пригодности прибора для выполнения заданной измерительной функции. Бессмысленно, например, производить измерение температуры азотной кислоты, погружая термометр с металлическим корпусом в жидкость. Подробнее эти вопросы будут рассмотрены ниже.

При выборе преобразователя необходимо учитывать его характеристики. В общем случае следует рассматривать четыре основные группы характеристик преобразователей.

1. Статические характеристики, описывающие свойства преобразователя, работающего в лабораторных условиях с малыми или даже нулевыми изменениями значения измеряемой величины без механических перемещений (если только перемещением не является сама измеряемая величина). Здесь речь идет о точности, разрешающей способности, линейности, чувствительности, гистерезисе и повторяемости характеристик. Лабораторные условия трудно определить, однако обычно принимают, что тем-

пература в этих условиях составляет 25°C , влажность 90 % и менее, давление (100 ± 10) кПа.

2. **Динамические характеристики**, определяющие свойства измерительного преобразователя, работающего в лабораторных условиях при быстром изменении измеряемой величины без перемещений преобразователя. Одной из важнейших характеристик, относящихся к динамической работе преобразователя, является уже определенное в гл. 1 время срабатывания, т. е. время, в течение которого устанавливается выходной сигнал преобразователя в ответ на изменение значения измеряемой величины.

Важно сделать так, чтобы любой преобразователь, измеряющий какую-либо величину, имел такой выходной сигнал, который отражал бы значение измеряемой величины в текущий момент времени. Другими словами, должна всегда существовать малая задержка между изменением значения измеряемой величины и ее отражением в измерительном сигнале. Эта задержка определяется главным образом временем срабатывания преобразователя и связанными с этим временем параметрами.

Когда рассматривается время срабатывания, обычно предполагается, что изменение измеряемой величины происходит скачком, т. е. мгновенно от одного значения к другому.

Линейная реакция первого порядка

На рис. 3.2 представлена диаграмма ступенчатого изменения измеряемой величины и возможная реакция на него в виде изменения выходного сигнала преобразователя. Отметим некоторые особенности приведенных на этом рисунке кривых.

Во-первых, кривая (называемая **переходной характеристикой**) является экспоненциальной и время нарастания выходного сигнала от начального значения до 63,2 % конечного значения называется **постоянной времени** и обозначается специальным символом τ . Во-вторых, по прошествии времени, равного 2τ , выходной сигнал достигает 86,5 % конечного значения. После того как пройдет время, равное 3τ , выходной сигнал достигает 95 %, после 4τ — 98,2 %, и наконец, по прошествии 5τ — 99,3 %.

Фактически выходное значение сигнала после каждого временного интервала τ равняется 63,2 % *разности*

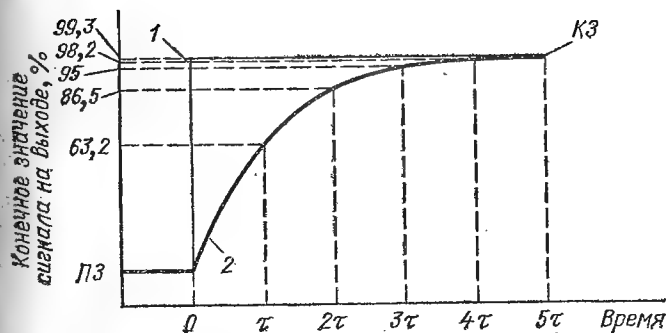


Рис. 3.2. Переходная характеристика линейного преобразователя первого порядка:

ПЗ — первоначальное значение; 1 — мгновенное изменение измеряемой величины; 2 — конечное значение

между значением в конце предыдущего отрезка и конечным значением. Выходные значения сигнала в процентах конечного значения по прошествии каждого отрезка времени продолжительностью в одну постоянную времени приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Переходная характеристика линейного преобразователя первого порядка

Интервал времени	Выходное значение в процентах конечного значения
1	63,2
2	86,5
3	95,0
4	98,2
5	99,3

Поскольку кривая на рис. 3.2 является экспонентой, это означает, что теоретически выходной сигнал не достигает никогда своего конечного значения. Поскольку по прошествии времени, равного 5τ , выходное значение сигнала отличается от его конечного значения всего лишь на 1 %, то практически можно считать, что после 5τ выходное значение конечно. Безусловно, это всего лишь инженерное приближение, ни больше, ни меньше. Промежуток времени, прошедший между моментами достижения

выходным сигналом соответственно 10 и 90 % его конечного значения, называется временем нарастания.

Важным следствием рассмотрения этой линейной характеристики первого порядка является то, что время срабатывания преобразователя можно в общем случае характеризовать постоянной времени τ .

Линейная реакция второго порядка

На рис. 3.3 показана переходная характеристика другого возможного преобразователя для ступенчатого изменения измеряемой величины. Она существенно отличается от рассмотренной ранее и свидетельствует о том, что выходное значение сигнала колеблется около конечного значения (с так называемой кольцевой частотой) прежде чем его достигнуть.

Максимальное значение, на которое выходной сигнал превосходит конечное значение, является выбросом кривой. Максимальное значение выброса имеет пик первого колебания. Если чувствительный элемент преобразовате-

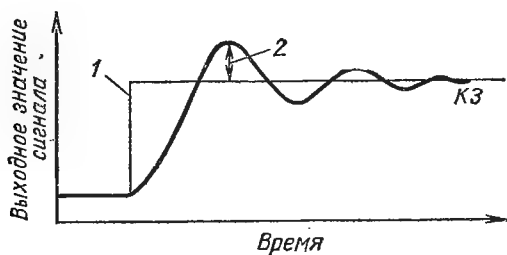


Рис. 3.3. Переходная характеристика линейного преобразователя второго порядка:

1 — мгновенное изменение измеряемой величины; 2 — выброс кривой; КЗ — конечное значение

ля работает в режиме свободных колебаний, то его частота называется **собственной угловой частотой** ω_n , не обязательно равной кольцевой частоте.

Время, в течение которого выходное значение колеблется вокруг конечного значения либо в течение которого оно вообще колеблется, зависит от **демпфирования**, прикладываемого к преобразователю. На рис. 3.4 показана переходная характеристика преобразователя для трех

типов демпфирования: **недостаточное демпфирование** (которое дает такую же переходную характеристику, что и представленная на рис. 3.3); **передемпфирование** (с переходной характеристикой, которая не колеблется, но имеет значительную постоянную времени установления конечного значения); **критическое демпфирование** (с переходной характеристикой без колебаний, достигающей конечного значения за кратчайшее время). Несомненно, критическое демпфирование является идеальным для такого преобразователя.

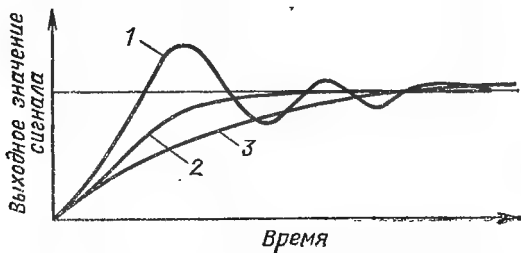


Рис. 3.4. Эффект демпфирования выходной переходной характеристики линейного преобразователя второго порядка:

1 — недостаточное демпфирование; 2 — критическое демпфирование; 3 — передемпфирование

Отношение действительного демпфирования к степени демпфирования, необходимого для критического демпфирования, называется **отношением демпфирования** или **коэффициентом демпфирования** и обозначается далее в тексте символом b . Так, отношение демпфирования, равное 1, означает критическое демпфирование, большее значение отношения соответствует передемпфированию, а меньшее — недостаточному демпфированию.

Преобразователи такого типа называются **преобразователями с линейной переходной характеристикой второго порядка**. В то время как преобразователи с линейной характеристикой первого порядка могут описываться одной величиной — постоянной времени, для описания преобразователей с линейной характеристикой второго порядка требуются две величины: отношение демпфирования b и собственная угловая частота ω_n .

Несколько сложнее вычислить линейную переходную характеристику второго порядка, но задача упрощается,

если начертить нормализованные кривые, т. е. переходные характеристики в нормализованных осях (рис. 3.5).

Нормализованные кривые переходных характеристик приложимы к любым измерительным преобразователям с линейной АЧХ второго порядка. Таким образом, зная

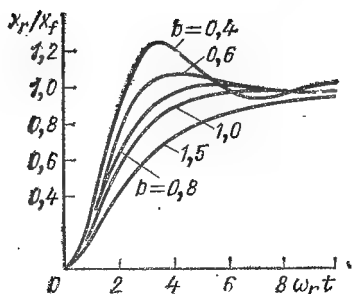


Рис. 3.5. Нормализованные кривые переходных характеристик линейных преобразователей второго порядка, с помощью которых переходная характеристика любого преобразователя с линейной реакцией второго порядка может быть вычислена при известном значении степени демпфирования:

x_f — конечное значение; x_r — реакция

отношение демпфирования, инженер просто выбирает соответствующую кривую, затем устанавливает временную шкалу в соответствии с известным значением собственной угловой частоты.

Преобразователи с линейными характеристиками первого и второго порядка

У преобразователей с линейными характеристиками первого и второго порядка много общего, но есть и различия, главные из которых должны быть известны специалистам. Какой из этих типов преобразователей использовать, зависит в большой степени от характера измеряемой величины.

Единственно, чем отличаются преобразователи с характеристикой (реакцией) первого порядка от преобразователей второго порядка, так это тем, что в математическом представлении переходной характеристики первых из них имеется уравнение, в котором максимальным порядком производной по времени является производная первого порядка. Таким образом, дифференциальное уравнение, описывающее поведение преобразователя первого порядка, записывается в виде

$$a = K \frac{dx}{dt},$$

т. е. реакция является функцией первого порядка, поскольку максимальная производная по времени dx/dt имеет первый порядок.

С другой стороны, если дифференциальное уравнение преобразователя записывается в виде

$$a = \frac{d^2 x}{dt^2} + 2b\omega_n \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x,$$

то его реакция является функцией второго порядка, поскольку максимальная степень производной по времени d^2x/dt^2 равна двум. Продолжим рассмотрение основных характеристик преобразователей.

3. Внешние условия. Они определяют работу прибора при изменениях измеряемой величины, наличии механических перемещений или других эффектах, вызванных внешними воздействующими факторами. Большинство измерительных преобразователей используется в условиях, далеких от идеальных. Стандартные значения комнатной температуры, влажности и давления редко встречаются в промышленности, и поэтому при выборе преобразователя должно быть известно, в состоянии ли он функционировать точно или по крайней мере в установленных пределах во всех возможных внешних условиях.

Воздействие температуры на работу прибора может быть заранее известно, а ее значение указывается изготовителем любого преобразователя для того, чтобы инженер мог спроектировать необходимую схему компенсации или скорректировать конечный результат измерительной системы. Аналогичным образом влияют на результат измерений вибрации, ускорения, изменения внешнего давления или неточный монтаж преобразователя.

Количество других внешних факторов зависит от того, как используется прибор. Помещение преобразователя в жидкость может оказывать влияние на его работу, если корпус не изолирован. Коррозия под действием солей, кислот и т. п. может также влиять на конечный результат, если корпус преобразователя соответствующим образом не защищен. Локальное электромагнитное поле также может воздействовать на преобразователь и схемы его соединения с измерительной системой.

4. Надежность — это способность преобразователя правильно работать в известных статических, динамических и внешних условиях в течение определенного периода времени. Как долго преобразователь может работать

правильно, определяется более точно в терминах его времени работы до отказа.

Существует большое число механизмов и процессов, приводящих к отказам, различна также и частота отказов. Общими типами отказов являются следующие:

1) **внезапные отказы**, при которых компоненты отказывают без предупреждения. Их нельзя предсказать;

2) **постоянные отказы**, которые можно предсказать, если проверка показывает рассогласование установленных и действительных результатов измерений;

3) **частичные отказы**, характерные тем, что преобразователь еще работает, хотя результаты его проверки находятся вне установленных допусков;

4) **полные отказы**, характеризующиеся невозможностью выполнять предписанные преобразователю функции;

5) **катастрофические отказы**, являющиеся и внезапными, и полными;

6) **деградационные отказы**, являющиеся и постепенными, и частичными.

Отказы компонентов могут происходить по разным причинам: из-за их неспособности работать в определенных условиях и внутренних недостатков, приводящих к отказам в установленных условиях эксплуатации.

Со временем отказывают все компоненты устройства. Очевидно, что невозможно точно определить, когда какой-либо определенный компонент откажет. Поэтому изготовители устанавливают вероятность отказов. Известно несколько способов введения вероятностных характеристик надежности.

Если существует вероятность возникновения отказа определенного компонента, оценить его безотказную работу можно с помощью **среднего времени между отказами** (mean time between failure — MTBF), которое определяется для множества идентичных компонентов следующим образом:

$$MTBF = \frac{\text{Общее время работы (в часах)}}{\text{Число перерывов в работе по причине отказа}}.$$

Если компоненты преобразователя являются невосстанавливаемыми, то вероятность появления отказов характеризуется **средним временем до отказа** (mean time to failure — MTTF), причем

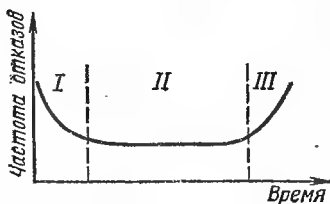
$$MTTF = \text{Время до каждого отказа} + \text{Общее время}$$

использования + Продолжительность замен/Число прерываний в работе

Долговечность компонентов иногда представляют графически в виде ваннообразной кривой, названной так из-за ее формы (рис. 3.6). Три различные области отчетливо просматриваются на этом рисунке. Когда компонент только вводится в эксплуатацию, частота возникновения отказов является весьма высокой. Отказы в течение это-

Рис. 3.6. Ваннообразная кривая изменения скорости отказов компонентов преобразователей во времени:

I — период выжигания; II — период полезной работы; III — период износа



го периода (часто называемого периодом выжигания) называются ранними отказами. Далее следует период, называемый периодом полезной работы, в течение которого отказы возникают реже с достаточно постоянной частотой. Во время периода износа заканчивается период полезной работы компонента, и поэтому частота появления отказов снова возрастает. Такие отказы называются износowymi.

Экономические факторы

Использование высокой технологии кремниевых изделий резко сокращает стоимость всех электронных систем, создавая дополнительные преимущества в виде более высокой надежности, простоты обслуживания и общего сокращения габаритов. Наряду с этим постоянно совершенствуется технология изготовления преобразователей. Современные приборы выполняются в одном корпусе со схемами формирования сигнала и улучшенными характеристиками по отношению к своим прототипам. Поэтому они позволяют создавать более дешевые измерительные системы, если принимать во внимание наличие схем формирования сигнала в преобразователях.

В будущем интеграция схем формирования сигнала будет продолжаться вплоть до создания преобразовате-

лей с цифровым выходом, полностью кодированным сигналом, пригодным для непосредственного соединения с микровычислительными и подобными устройствами. В настоящее время уже имеется несколько подобных преобразователей. Тем не менее всегда найдутся аргументы в пользу аналоговых измерительных приборов, поскольку цифровые системы никогда не станут дешевле аналоговых и будут существовать такие области применения, где аналоговую технику нельзя заменить цифровой.

Для пользователя стоимость системы является немаловажным фактором, и его следует иметь в виду, поскольку возможно большое число решений для каждого рассматриваемого элемента. Чтобы принять лучшее решение, инженер должен рассмотреть все возможные альтернативы — цифровые, аналоговые, цифро-аналоговые и проанализировать возможные варианты систем с учетом их стоимости.

Если, например, система может выполнять заданные функции только при наличии высокоточных, высоконадежных и высокочувствительных преобразователей (которые будут, вне сомнения, также и дорогими), то стоимость оставшейся части измерительной системы должна быть мала по сравнению со стоимостью преобразователей. С другой стороны, если требования к преобразователям невысокие и их немного, то можно использовать некоторые старые типы преобразователей, и в этом случае стоимость системы будет определяться в большей степени стоимостью оставшейся части, а не самих преобразователей.

Экономические соображения учитываются, конечно, не только при выборе преобразователей, но и любой другой продукции. Кроме того, они являются достаточно сложными, поэтому многие из них невозможно полностью раскрыть в данной книге.

ГЛАВА 4

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Основной величиной, которая рассматривается в этой главе, является температура. Температура тела может, конечно, использоваться для определения наличия тела, поэтому здесь рассматривается также один из методов обнаружения самого тела.

Температура тела или системы представляет собой отражение их термического состояния. Это мера кинетической энергии, обусловленной тепловым движением молекул тела или системы, т. е. потенциалом теплового потока. Тепло есть энергия, обусловленная разностью температур между телом или системой и окружающей средой.

Тепло может передаваться от одного тела или системы к другому (или нескольким) следующими способами: 1) теплопроводностью — диффузией через среду; 2) конвекцией — движением среды; 3) излучением — с помощью электромагнитных волн.

Теплоемкость — это количество тепла, необходимого для повышения температуры тела или системы на один градус. **Удельная теплоемкость** — это отношение теплоемкости тела к его массе.

Термическое сопротивление является мерой способности тела препятствовать прохождению через него теплового потока. **Тепловое равновесие** представляет собой состояние между телом или системой и окружающей средой, когда между ними нет переноса тепла.

Точкой кипения называется температура, при которой наступает равновесие между жидким и парообразным состояниями вещества. **Точкой замерзания** называется температура равновесия между твердой и жидкой фазами. Для воды точка кипения соответствует 100°C , а точка замерзания или льда 0°C . Все эти характеристики имеют смысл только при стандартном атмосферном давлении $101,325\text{ МПа}$.

Температурные шкалы

Температурная шкала Цельсия, при которой измерения проводятся в градусах Цельсия, это лишь одна из нескольких используемых температурных шкал. Она первоначально определялась точками замерзания и кипения воды. **Термодинамическая шкала** согласно Международной системе единиц имеет несколько трудновоспроизводимых точек. Во-первых, **абсолютный нуль** (0 К — заметим, что температура в термодинамической шкале выражается в градусах Кельвина, которые записываются без указания знака градуса), представляющий собой теоретический минимум температуры для любого вещества и, во-вторых, **тройную точку воды** ($273,16\text{ К}$).

Последняя соответствует температуре равновесия, в которой одновременно существуют вода, лед и пар. В термодинамической шкале 0°C воспроизводится при стандартном давлении 273,16 К.

Использование 100 дискретных или равномерных шагов температуры между точками кипения и замерзания воды при стандартном атмосферном давлении в шкале Цельсия является совершенно произвольным. Столь же произвольно применяются 180 дискретных шагов по шкале Фаренгейта. Конечно, наличие 100 шагов в температурной шкале Цельсия делает ее десятичной и способствует ее международному признанию наряду с термодинамической шкалой. Международная практическая температурная шкала (МПТШ), рекомендованная Международным комитетом мер и весов в 1983 г., базируется на определенных значениях температур совокупности равновесных состояний и стандартной аппаратуре, калиброванной на этих значениях.

Применение температур состояний равновесия и стандартной аппаратуры в МПТШ гарантирует, что расхождение в измерениях температуры, обусловленное

Таблица 4.1. Основные фиксированные точки МПТШ, значения температуры в них и используемые для этого измерительные средства

Название	Температура, К	Измерительные средства
Точка затвердевания золота	1337,58	Оптический пирометр (свыше 1337,58 К) Термопара (от 903,87 до 1337,58 К)
Точка затвердевания серебра	1235,08	
Точка затвердевания цинка	692,73	
Точка кипения воды	373,15	
Тройная точка воды	273,16	
Точка кипения кислорода	90,188	Платиновый термометр сопротивления (от 13,18 до 903,89 К)
Тройная точка кислорода	54,361	
Точка кипения неона	27,102	
Точка кипения равновесного водорода	20,28	
Равновесие между жидкой и газовой фазами равновесного водорода при давлении в 33330,6 Па	17,042	
Тройная точка равновесного водорода	13,81	—

разными типами измерительных приборов, может быть сведено к минимуму. В интервалах между опорными точками точность измерений сохраняется за счет использования уравнений интерполяции. В табл. 4.1 перечислены 11 основных фиксированных точек МПТШ и указаны измерительные приборы, необходимые для воспроизведения температур в этих точках.

Платиновые термометры сопротивления

В этих преобразователях используется изменение сопротивления проволоки или пленки из платины для определения температуры. Они называются **резистивными детекторами температуры**. Отсюда не следует, что другие металлы не могут быть использованы для измерения температуры, однако наиболее часто в таких преобразователях применяются платиновые чувствительные элементы.

Чувствительность резистивных температурных преобразователей весьма низкая, а динамическая реакция — довольно медленная (в силу конструкции прибора). Они подвержены разрушению при вибрациях и ударах.

Зависимость сопротивления от температуры была впервые полностью определена для промышленного платинового термометра сопротивления в Бюро стандартов в 1904 г. для диапазона температур от -220 до $+1050^{\circ}\text{C}$.

Существуют два основных типа платиновых проволочных резистивных преобразователей: погружаемый в среду зонд и монтируемый на поверхности чувствительный элемент. Проволочные элементы обычно устанавливаются на керамической основе с минимальным натяжением и, как правило, покрываются защитным материалом, предотвращающим их от воздействия окружающей среды.

Конструкция типового платинового проволочного зонда показана на рис. 4.1, а, а монтируемого на поверхности чувствительного температурного элемента — на рис. 4.1, б. Преобразователи с пленочными чувствительными элементами (рис. 4.1, в), в которых применяется металлическая фольга, расположенная на изолирующей подложке, не столь распространены, как проволочные, хотя сфера их использования постоянно расширяется, поскольку они имеют малые размеры, улучшенную дина-

мическую реакцию, более высокую чувствительность и относительно низкую стоимость.

Платиновые резистивные преобразователи обычно включаются в одно из плеч моста Уитстона, с помощью которого обеспечивается высокая точность измерений. Конечно, невысокое сопротивление прибора (около 100 Ом) создает проблемы при его коммутации с изме-

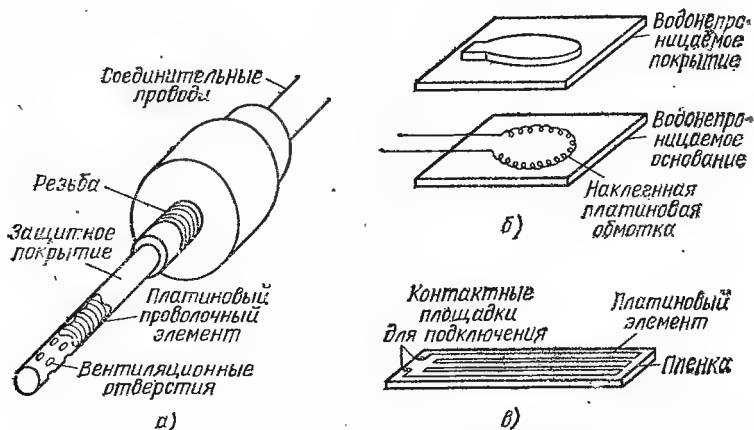


Рис. 4.1. Конструкции платиновых проволочных резистивных преобразователей:

а — проволочный зонд; б — проволочный преобразователь, монтируемый на поверхности чувствительного элемента; в — тонкопленочный преобразователь, устанавливаемый на поверхности чувствительного элемента

рительной аппаратурой, поскольку сопротивление проводов, соединяющих преобразователь с измерительной схемой, может быть соизмеримо с сопротивлением преобразователя (см. гл. 9).

Термисторы

Термистор представляет собой по существу полупроводниковый резистивный прибор, сопротивление которого зависит от температуры. Такие приборы имеют обычно отрицательный температурный коэффициент, т. е. их сопротивление падает с увеличением температуры. Термисторы используются в диапазоне температур от -50 до $+300^{\circ}\text{C}$, хотя за счет специальных интерфейсных решений не исключено измерение температуры и за ука-

занными пределами. Основной причиной столь узкого температурного диапазона термисторов является существенная нелинейность их характеристик.

Для изготовления термисторов обычно в качестве полупроводниковых материалов используются спекаемые смеси сульфидов или селенидов, однако применяются также окиси кобальта, меди, железа, марганца или урана. Эти материалы оформляются в виде шариков, дисков, стержней или шайб, которые затем помещаются в капсулы из стекла, пластика или металла, а иногда просто покрываются этими материалами. Небольшие размеры чувствительных элементов обеспечивают их высокую динамическую реакцию, а некоторые миниатюрные типы элементов имеют динамическую реакцию всего в несколько микросекунд.

Из известных типов термисторов наиболее широкое распространение получили зонды и базовые чувствительные элементы. По конструкции они очень похожи на обычные резисторы, за исключением используемых материалов, сопротивление которых зависит от температуры. Термисторы, как правило, не нуждаются в точной настройке интерфейсных схем, поскольку они имеют широкие допуски. Конечно, некоторые типы термисторов обладают допусками порядка $\pm 0,2^\circ\text{C}$ в пределах установленного температурного диапазона, для обеспечения которых может потребоваться специальная подстройка.

Термопары

Чувствительность термопары к температуре основывается на эффекте Зеебека (чаще известном в отечественной литературе под названием термоэлектрический эффект), при котором используется соединение двух разнородных материалов. Когда два соединения находятся при разных температурах, то в соединяющей их цепи течет электрический ток.

Значение тока или ЭДС, генерируемой током, определяется разностью температур между двумя соединениями (спаями) и материалами, из которых изготовлены термопары.

Спай, температуру которого необходимо измерить, называется чувствительным спаем. Другой спай (опорный) обычно находится при заранее известной температуре, например температуре замерзания воды (0°C).

Опорная температура должна выдерживаться с определенной точностью. Для достижения высокой точности в лабораторных условиях в этих целях используется, например, тройная точка воды.

Напротив, при менее жестких требованиях для получения опорной температуры может быть использована печь с регулируемой температурой. При проектировании систем для измерения температуры следует учитывать ее стоимость.

Требуется также специальное оборудование для отображения измеренного значения температуры и автоматической компенсации внутренней опорной температуры. Подобные термометрические системы характеризуют температуру, определяемую чувствительными элементами, с требуемой точностью и исключают необходимость для пользователя вычислять температуру чувствительного элемента по значению генерируемой им ЭДС.

Для достижения максимальной точности применяются специальные таблицы наиболее распространенных типов термопар, в которых разность температур (обычно по отношению к опорной температуре 0°C) сопоставляется со значениями генерируемой ЭДС. Наиболее типичные термопары перечислены в табл. 4.2, где указаны

Таблица 4.2. Наиболее употребительные материалы стандартных термопар. Типы термопар соответствуют тем, для которых на рис. 2.19 приведены температурные зависимости

Тип	Номер английского стандарта	Первичная обмотка	Вторичная обмотка
E		Никель 90 % Хром 10 %	Константан (57 % меди, 43 % никеля)
I	BS1828	Железо	Константан
K	BS1827	Никель 90 %, хром 10 %	Никель 94 %, марганец 3 %, алюминий 2 %, кремний 1 %
R	BS1826	Платина	Платина 87 %, родий 13 %
S	BS1826	Платина	Платина 90 %, родий 10 %
T	BS1818	Медь	Константан

также английские стандарты, в соответствии с которыми они изготовлены.

Термопары изготавливаются обычно в виде зонда, но, поскольку в них требуется наличие спая из двух материалов, возможно изготовление таких первичных изме-

рительных преобразователей, в которых чувствительный элемент содержит две проволоочки из термопарных материалов, спаянных вместе на тонком кончике. Различные формы спаев приведены на рис. 4.2. Они выполняются посредством сварки, пайки твердым припоем или пайки серебряным припоем.

Кончик спаянных проволоочек может быть помещен в зонд или непосредственно в среду, температура которой измеряется. Спаи выполняются заземленными или не заземленными на защитный кожух. Не исключено при-

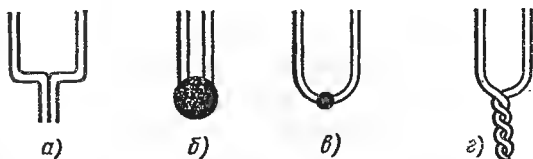


Рис. 4.2. Типовые формы спаев в термопарных температурных измерительных преобразователях:

а — сваренные внахлест; б — развальцованные; в — сваренные встык; г — винты провода

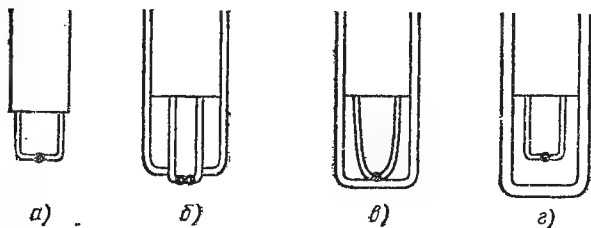
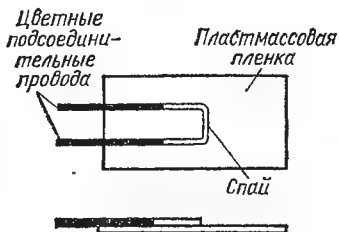


Рис. 4.3. Возможные типы термопарных зондов:

а — открытый и незаземленный; б — открытый и заземленный; в — закрытый и заземленный; г — закрытый и незаземленный

Рис. 4.4. Типовая конструкция пленочного термопарного преобразователя



менение открытых или закрытых спаев, как это показано на рис. 4.3. Третья форма термопар является спаем фольги, смонтированной на некоторой подложке (рис. 4.4). Фольга может представлять собой магнитную пленку, легко прикрепляемую к любой ферромагнитной поверхности, температура которой измеряется.

Термопары прочны и экономичны, поскольку их точность основывается на эталонных значениях температуры, требования к воспроизведению которой не являются чрезмерно высокими. Они обладают довольно хорошими динамическими свойствами, так как имеют миниатюрный чувствительный элемент и могут быть использованы в широком диапазоне температур.

Другие термопары

В последние годы появились разнообразные методы измерения температуры термометрическими средствами. Полупроводниковые температурные чувствительные элементы, выполненные в виде интегральных схем, генерируют на своих выходах электрический ток, пропорциональный абсолютной температуре. Такие измерительные преобразователи обладают достаточно хорошей линейностью и имеют чувствительность порядка 1 мкА выходного тока на один градус Кельвина.

Схема их подключения к измерительной цепи аналогична термисторам, однако они более эффективны для работы в дистанционных измерительных системах, в которых ток, генерируемый чувствительным элементом, не изменяется для любой измеряемой температуры. Поэтому сопротивлением соединительных проводов и падением напряжения на них можно пренебречь.

Другие типы полупроводниковых чувствительных элементов генерируют на выходе напряжение, пропорциональное температуре. Например, один из таких приборов имеет выходное напряжение 10 мВ на один градус Кельвина.

Полупроводниковые чувствительные элементы основаны, конечно, на принципе пропорционального изменения тока $p-n$ -переходов или напряжения на переходе в зависимости от температуры. В конечном счете все простейшие полупроводниковые диоды на основе германия, кремния, арсенида галлия и других материалов могут быть использованы в качестве чувствительных эле-

ментов измерительных преобразователей температуры. Отрицательный температурный коэффициент $p - n$ -переходов означает, что напряжение на переходе падает примерно на 2 мВ на каждый градус Кельвина.

Характеристики транзисторов также изменяются в зависимости от температуры, и это позволяет их применять для измерения температуры. Верхний диапазон измеряемых температур ограничивается током утечки полупроводниковых переходов. Последние используются для измерения температур в диапазоне от -50 до $+150^{\circ}\text{C}$.

Радиационная пирометрия

Все ранее рассмотренные первичные измерительные преобразователи относятся к термометрическим преобразователям, т.е. к преобразователям, основанным на прямом контакте с телом, температура которого измеряется. Радиационная пирометрия представляет собой науку об измерениях температуры тела без непосредственного контакта с ним, т.е. с использованием энергии излучения нагретого тела, ее регистрации и отображения в единицах температуры.

Пирометр — это первичный измерительный преобразователь температуры, который определяет энергию излучения тела. По своей природе он является дистанционным (бесконтактным) первичным измерительным преобразователем.

В общем случае пирометр представляет собой целую систему, содержащую в себе: 1) совокупность оптических линз для фокусировки энергии излучения на преобразующем элементе; 2) преобразующий элемент для восприятия энергии излучения; 3) электронные схемы для сопряжения преобразующего элемента с последующими блоками системы.

Все типы пирометров основаны на излучении тепла телом, температура которого измеряется. Принцип работы прибора показан на рис. 4.5, где сам пирометр изображен в виде ящика с отверстием, через которое энергия излучения проходит от тела к преобразующему элементу. Количество энергии, исходящей от тела, зависит от его температуры и способности к излучению. Последняя для данного тела является неизменной и определяется материалом тела.

На первый взгляд, количество энергии, подаваемое в пирометр, зависит от расстояния до тела: энергия обратно пропорциональна квадрату расстояния между пи-

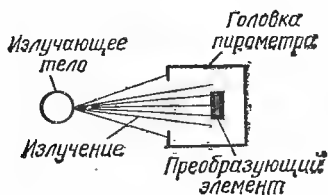


Рис. 4.5. Принцип действия радиационного пирометра

рометром и телом (рис. 4.6, а). Другими словами, количество энергии, достигающей преобразующего элемента, уменьшается пропорционально квадрату расстояния от тела. Однако площадь поверхности тела, которую «видит» преобразующий элемент пирометра, увеличивается пропорционально квадрату расстояния до тела (рис. 4.6, б).

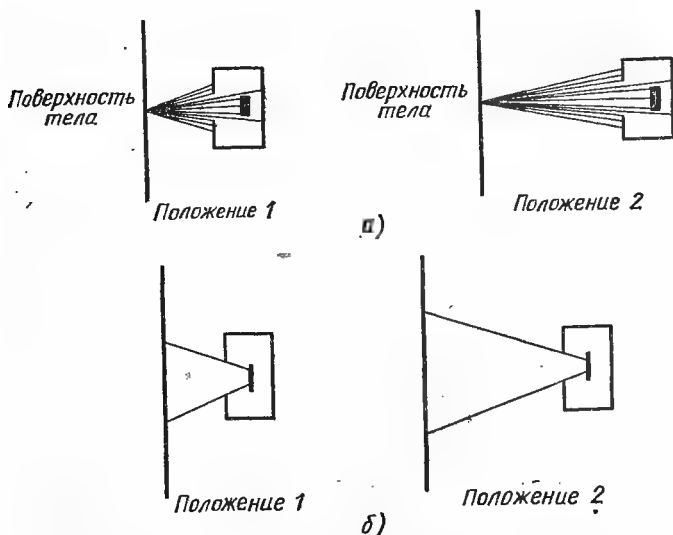


Рис. 4.6. Иллюстрация того, что расстояние от пирометра до тела, температура которого измеряется, не изменяет выхода пирометра

Таким образом, излучение, достигающее пирометра, не зависит от его расстояния до тела (при условии, что поверхность тела полностью заполняет область «видения» пирометра). Отсюда следует, что при известной способности тела к излучению пирометр непосредственно регистрирует температуру тела.

Преобразующий элемент устройства может быть выполнен в форме любого из ранее рассмотренных преобразователей для измерения температуры. Обычно в пирометрах используются для этой цели термопары, резистивные чувствительные элементы (они называются болометрами) или полупроводниковые приборы. Как правило, пирометры представляют собой довольно громоздкие приборы, однако их последние модификации отличаются небольшими размерами за счет использования в них чувствительных элементов, измеряющих излучение непосредственно на основе фотоэлектрического или пироэлектрического эффекта и выполненных в виде интегральных схем. Такие пироэлектрические детекторы имеют в своем составе все три основные части пирометра, но в миниатюре. Они недороги, устойчивы к внешним воздействиям и способны непосредственно сопрягаться с элементами измерительной системы.

Пирометрический эффект определяется свойствами керамической пластины: при нагревании в процессе изготовления в электрическом поле в пластине происходит упорядочение кристаллических диполей. Когда материал охлаждается, это упорядочение в той или иной мере сохраняется, что приводит к эффективному формированию конденсатора. Температура пластин определяет точную степень упорядоченности, поэтому заряд на конденсаторе также изменяется в зависимости от температуры.

Перестраиваемые фильтры, расположенные перед окном пирометра, позволяют сделать прибор чувствительным к различным частям излучаемого спектра. Интегральный полевой транзистор затем производит усиление сигнала и сопряжение преобразующего элемента с другими частями измерительной системы.

Поскольку пироэлектрические детекторы воспринимают температуру дистанционно, т.е. без физического контакта, они могут применяться для обнаружения того или иного тела, образуя основу детекторов наличия или приближения предметов.

Термостаты

Термостаты представляют собой обычный тип температурных преобразователей с открытым или закрытым одним или несколькими электрическими контактами, определяющими прохождение определенной температурной точки. Они реализуют скорее дискретный, нежели непрерывный способ восприятия температуры. По этой причине их называют иногда температурными переключателями и редко используют в измерительных системах. Однако довольно часто они применяются в системах управления, когда требуется лишь, чтобы температура не превышала некоторого значения или не опускалась ниже установленного уровня. Примером такого прибора является домашний комнатный термостат.

Чаще всего в конструкцию термостата входит биметаллический чувствительный элемент, в котором два металла с различными коэффициентами температурного расширения механически соединены друг с другом в виде ленты. Когда температура изменяется, длина каждого индивидуального слоя металла изменяется различным образом, полоска (лента) изгибается и замыкает электрический контакт.

Полупроводниковые термостаты, обладающие такими же характеристиками, как и биметаллические, также находят широкое применение. Полностью твердотельные, без подвижных частей, эти приборы функционируют как высокоомные сопротивления (приблизительно 100 кОм), когда внешняя температура не превышает значения, при котором происходит их переключение. Если же температура превышает установленное значение, то сопротивление термостата резко снижается (приблизительно до 100 Ом). Термостаты могут работать в широком диапазоне номинальных точек переключения (в градусах Цельсия). Однако на практике используются точки переключения, отличающиеся от номинального значения температуры на $\pm 5^\circ\text{C}$.

ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Измеряемые величины, рассматриваемые в этой главе (ускорение, перемещение, сила, масса, движение, положение, скорость, напряжение, усилие, момент, вибрация), а также соответствующие первичные преобразователи определяют механику твердых тел.

Деформация, напряжение

Наиболее распространенным преобразователем для обнаружения и измерения деформации и напряжения является **тензометр**, содержащий тонкий проводящий или полупроводниковый элемент, смонтированный на поверхности, которая подвергается деформации или напряжению. Когда эта поверхность испытывает малые растяжения и сжатия под действием силы, аналогичные же испытания «ощущает» и тензометр, в результате чего изменяется сопротивление преобразователя вследствие пьезоэлектрического эффекта.

Хотя тензометры — это детекторы, обнаруживающие деформацию только в том месте поверхности, где они размещены, деформации могут быть вызваны различными измеряемыми величинами. Поэтому эти приборы позволяют регистрировать давление, массу, напряжение, момент и др.

Тензометры характеризуются двумя основными параметрами: коэффициентом тензочувствительности и сопротивлением. Коэффициент тензочувствительности представляет собой отношение изменения сопротивления тензометра в процентах к изменению длины в процентах.

Существует несколько типов тензометров. Простейшим из них является одиночный преобразователь пленочного типа, поддерживаемый полиэфиром. В нем металлическая пленка с помощью фототравления преобразуется в тензометр. Благодаря применению такой технологии достигаются небольшие размеры прибора (менее 1 мм) и высокая устойчивость по отношению к внешним температурам и нагрузкам.

Преобразователи с двумя и более тензометрическими элементами также находят широкое распространение и имеют множество форм исполнения. Когда два тензо-

метра или более монтируются в виде розетки, появляется возможность измерять значение и направление более чем одного напряжения в случае приложения сложной нагрузки.

Тензометрический коэффициент преобразователя, выполненный на основе металлической пленки, равен 2—4, а его сопротивление колеблется в диапазоне от 100 до 1000 Ом. Полупроводниковые тензометры имеют тензометрический коэффициент порядка 50—200, и поэтому они более чувствительны к прикладываемому напряжению. При этом нет необходимости использовать усилительные схемы, поскольку выходное напряжение полупроводникового тензометрического моста составляет примерно 1 В.

К сожалению, сопротивление полупроводникового преобразователя изменяется в зависимости от прикладываемого напряжения и является существенно нелинейным во всем диапазоне напряжений, а также сильно зависит от температуры. Таким образом, хотя при работе с тензометром на основе металлической пленки требуется усилитель, его линейность весьма высока, а температурный эффект можно легко скомпенсировать.

На практике в основном применяются полупроводниковые тензометры двух типов. Во-первых, диффузионный или незащищенный тензометр, где полупроводниковый элемент монтируется непосредственно на поверхности тела, деформация или напряжение которого измеряются, и, во-вторых, капсулированный тензометр, где чувствительный элемент монтируется на кронштейне, который, в свою очередь, размещается на измеряемой поверхности. Диффузионный тензометр предпочтительнее с точки зрения размеров (как правило, он занимает всего несколько квадратных миллиметров) и точности измерений. Однако он очень хрупок, требует бережного отношения и аккуратного монтажа. Аналогично тензометрам на основе металлической пленки полупроводниковые приборы можно объединять в розетки из двух и более преобразователей.

Перемещение, положение, движение

Тензометры работают, поскольку изменяется длина чувствительного элемента, к которому прикладывается напряжение. Отсюда следует, что если расстояние между

двумя заранее выделенными точками чувствительного элемента изменяется, то, значит, к нему прикладывается напряжение. Таким образом, тензометр можно использовать и для измерения перемещений, правда, очень небольших.

Для этого преобразователь перемещения имеет в своем составе изгибающийся стержень, к которому крепится тензометрический чувствительный элемент. Подобная конструкция не является обязательной, однако она применяется в некоторых преобразователях, спроектированных для измерения других физических величин (см. разделы, посвященные преобразователям для измерения массы, ускорения, давления и др.).

Кодирующее устройство

Когда решается задача об измерении значительных перемещений (1 м и более), в кодирующем устройстве используется большая группа преобразователей перемещения. Кодирующие устройства (шифраторы) представляют собой преобразователи, в которых на выходе в цифровой форме представляются воспринимаемые ими перемещения. Линейные перемещения воспринимаются линейным, а угловые — угловым или поворотным кодирующим устройством.

Основные принципы кодирования показаны на рис. 5.1. По существу, все типы преобразователей имеют в своем составе движущийся диск или полосу определенного рода с большим количеством дорожек, которые сканируются щеткой (рис. 5.1, а), световым лучом (рис. 5.1, б) или магнитной катушкой (рис. 5.1, в).

В случае щеточного кодирующего устройства диск или полоска являются приводящими, но имеют на поверхности изолирующие сегменты. Когда щетка касается проводящей части, схема закрыта, а когда она касается изолирующих сегментов, схема открывается. Вследствие загрязнений, трения, ограниченного срока службы и т. п. щеточные кодирующие устройства не нашли широкого применения.

В оптическом кодирующем устройстве диск или полоска содержат либо прозрачный слой с светонепроницаемыми сегментами на его поверхности, либо отражающий слой с поглощающими сегментами. В первом случае, когда непрозрачный сегмент оказывается между источ-

ником света и светодетектором, луч света прерывается. Если же между источником света и светодетектором оказывается прозрачный участок, то световой луч полностью проходит на детектор. Во втором случае луч либо отражается, либо не отражается, следовательно, свет от источника либо попадает на чувствительный элемент, либо нет.

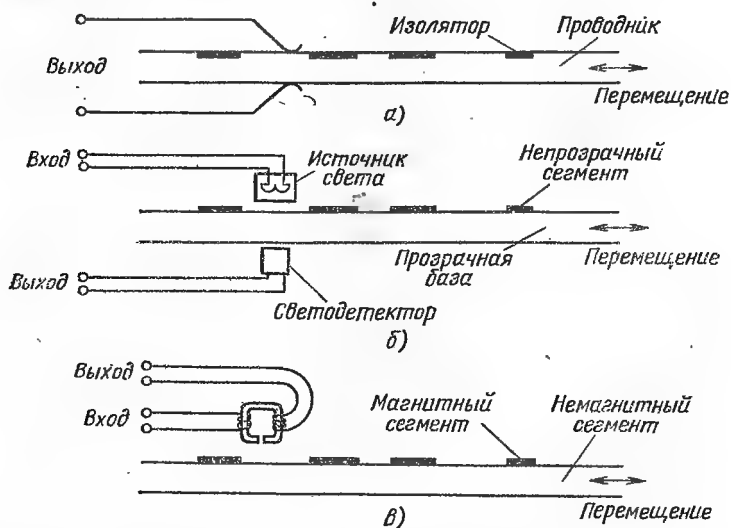


Рис. 5.1. Основные принципы кодирования:

а — с помощью щеток; б — с помощью оптического устройства; в — с помощью магнитного устройства

В магнитном кодирующем устройстве диск или полоска немагнитные, но на основном материале имеются магнитные сегменты, которые охватываются магнитной головкой с входной и выходной катушками. Зондирующий сигнал (обычно импульсный с постоянной амплитудой и частотой 200 кГц или положительные логические импульсы) прикладывается к входной катушке. Поэтому, когда головка проходит над участком с основным материалом, выходной сигнал появляется на выходной катушке. Конечно, если головка проходит над намагниченным участком, то выходной сигнал не образуется.

На практике используются два основных типа кодирующих устройств: шифраторы приращения и абсолют-

ные шифраторы. Сами эти названия отражают тот факт, что шифратор приращения может индцировать только перемещение при движении от начального состояния. В то же время абсолютный шифратор индцирует абсолютное положение. С другой стороны, шифратор приращения должен возвращаться в свое начальное состояние, когда система включается, т.е. последняя имеет фиксированную точку. Для абсолютного шифратора этого не требуется — его выход непосредственно показывает положение объекта.

Шифраторы приращения (рис. 5.2) генерируют выходные импульсы, которые подсчитываются реверсивным

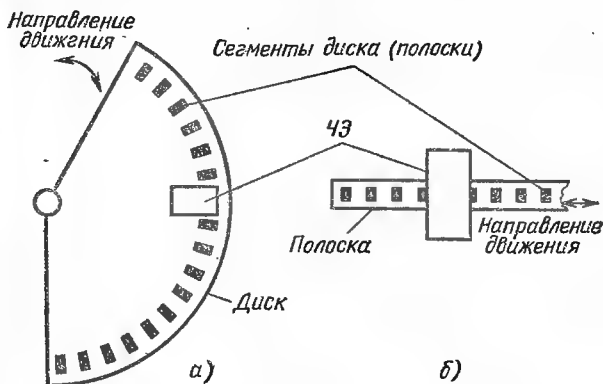


Рис. 5.2. Принципы работы шифраторов приращения:

а — угловой шифратор; б — линейный шифратор; ЧЭ — чувствительные элементы

счетчиком, поэтому его показания соответствуют тому, как далеко диск или полоска продвинулись с начала счета. Здесь в основном применяются два чувствительных элемента, расположенных в преобразователе таким образом, что их выходы сдвинуты относительно друг друга на 90° по фазе. В этом случае можно использовать специальную логическую схему для определения направления и, следовательно, для определения того, вверх или вниз должен считать счетчик.

Разрешающая способность шифратора приращения такого типа зависит от количества чувствительных сегментов на диске или полоске преобразователя. Поэтому можно говорить о механическом пределе их чувствитель-

ности. Оптические шифраторы приращения интерферометрического типа обладают существенно более высокой разрешающей способностью за счет эффективного увеличения расстояния между чувствительными сегментами.

Муаровые интерференционные картинки образуются благодаря наличию двух пластинок, каждая из которых имеет серию параллельных непрозрачных штрихов, расположенных под небольшим углом друг к другу (рис. 5.3). Когда одна пластинка перемещается по отношению к другой в направлении, перпендикулярном штрихам, появляются полосы Муара в виде темных полосок, движущихся в направлении штрихов.

Полосы Муара перемещаются вверх, когда пластинки движутся относительно друг друга в одном направлении, и вниз — когда в другом направлении. Длина перемещения полос существенно больше, чем расстояние между штрихами, что, в свою очередь, приводит к увеличению разрешающей способности прибора. Коэффициент повышения разрешающей способности обратно пропорционален углу в радианах между штрихами (это справедливо только для малых углов). Так, для шифратора приращения со штрихами, расположенными на расстоянии 0,05 мм друг от друга, когда две пластинки находятся под углом 0,01 рад, этот коэффициент равен 100 и интерференционные полосы раздвигаются на 5 мм.

Абсолютные шифраторы (рис. 5.4) реализуют кодированный выход, который индицирует абсолютное положение измеряемого объекта. При этом кодирование производится в том же двоичном коде, что и во всех мик-

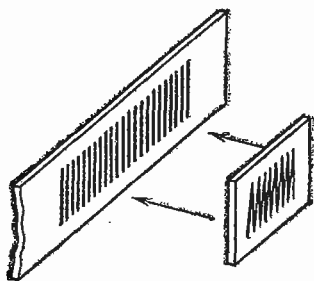


Рис. 5.3. Возникновение полос Муара в оптическом интерферометрическом шифраторе приращений

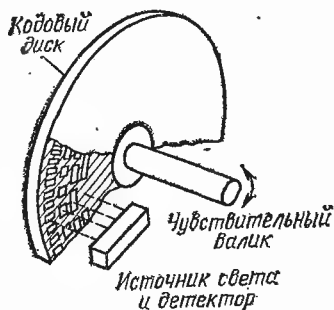


Рис. 5.4. Принцип действия абсолютного шифратора вращения

ропроцессорах и ЭВМ, а его длина соответствует длине кода измерительной системы. В угловых шифраторах с длиной кода 20 бит разрешающая способность преобразователя обеспечивает возможность производить измерения с точностью до миллионной доли (млн^{-1}).

Конечно, обычный бинарный код вызывает определенные измерительные проблемы, поскольку требуется больше одного изменения в разрядах соседних кодов, чтобы обозначить разность между ними. Например, для изменения состояния от кода 0011 к коду 0100 (единичный шаг между двоичными кодами длиной в одну десятичную единицу — от 3 до 4) теоретически необходимо, чтобы в трех разрядах произошли одновременные изменения; на практике же можно обеспечить, чтобы все разряды, изменяющие состояние двух соседних кодов, менялись одновременно. Например, коды 0010, 0001, 0111, 0111, 0110 и 0101 можно рассматривать как коды изменения.

Простейшим способом решения этой проблемы является использование цифровой последовательности кодов, в которой необходимо менять только один разряд, чтобы зафиксировать изменение между любыми состояниями. Примером такой последовательности является код Грея. Для 4-разрядных чисел он имеет следующий вид: 0000, 0001, 0011, 0010, 0110, 0111, 0101, 0100, 1100, 1101, 1111, 1110, 1010, 1011, 1001, 1000.

Независимо от того, какой код используется в шифраторе, измерительная система должна его преобразовать в обычный двоичный цифровой код.

Неоднозначность отсчетов шифраторов с обычным бинарным кодом можно минимизировать также с помощью методов сканирования, которые обычно реализуются за счет включения двух преобразующих элементов на каждую дорожку. При этом ведущий элемент располагается несколько впереди ведомого. Вместе с внешней логической схемой эти элементы определяют действительный выход преобразователя. Наибольшую известность получил метод V-сканирования, хотя применяются также методы U- и M-сканирования.

Принцип действия любого из указанных методов заключается в том, что вне зависимости от используемой обычной двоичной последовательности изменение системы от одного состояния к соседнему должно осуществляться за счет изменения состояния младшего разряда

кода. При увеличении двоичного числа, если младший разряд изменяет свое состояние с 0 до 1, не должно происходить изменений в других разрядах. Конечно, если младший разряд переходит из 1 в 0, то как минимум еще один разряд должен изменить свое состояние. При возрастании двоичного кода все происходит наоборот. Внешние логические схемы должны интерпретировать эти случаи и осуществлять переключения между ведущим и ведомым преобразующими элементами, чтобы обеспечить однозначность выходного кода.

Одним из недостатков любого двоичного цифрового кода является то, что общее число кодов в последовательности равно некоторой степени 2 (например, из 4-разрядного кода Грея видно, что общее число кодов $2^4=16$). В случае угловых шифраторов не исключена ситуация, когда может потребоваться, чтобы выход преобразователя отображал угловое положение объекта непосредственно в градусах. Поскольку в одном полном повороте диска содержится 360° , здесь получается двоичный цифровой циклический код, напоминающий код Грея с 360° различными «словами». В таком шифраторе используется обычно электронная маска, которая на выходе прибора при прохождении диска от 359 к 0° генерирует нулевой код, не создающий проблем неоднозначности, так как все нули генерируются от одного и того же сигнала и возникают одновременно.

Потенциометрические преобразователи перемещения

Простейший преобразователь перемещения представляет собой резистивный потенциометрический делитель, в котором скользящий контакт или движок потенциометра перемещаются вдоль резистивного элемента (рис. 5.5). Движок механически соединяется с чувствительным валиком (штифтом), который повторяет движения объекта измерений. Когда на резистивный элемент подается напряжение, то напряжение, снимаемое с движка потенциометра, индицирует значение перемещения.

Линейные и поворотные угловые преобразователи перемещения, основанные на принципе деления напряжения, распространены довольно широко. Угловые преобразователи используются для измерения угловых перемещений от нескольких градусов до 7200° (т.е. до 20 оборотов диска), а линейные работают в диапазоне от

нескольких миллиметров до нескольких метров. Эти приборы нуждаются в электрических связях с резистивными элементами, за счет чего их конструкция становится слишком громоздкой и ограничивается предел перемещений при вращении. Например, одноповоротный преобразователь используется только для измерения перемещений на 350° .

Форма резистивного элемента определяет разрешающую способность преобразователя. Когда этот элемент

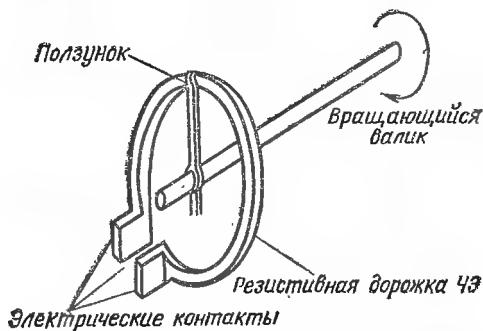


Рис. 5.5. Использование простейшего потенциометрического устройства для определения направления вращения вала

выполнен из проволоки, разрешение зависит от числа витков проволоки на единицу длины элемента. В других типах преобразователей, основанных на принципе деления напряжения, используется пленка из пластика, металла, углерода или металло-керамической смеси (известной как металлокерамика) для создания резистивного элемента, что позволяет теоретически иметь бесконечное разрешение.

Емкостные преобразователи перемещения

Все емкостные преобразователи перемещения работают на принципе конденсатора, который образуется двумя пластинами, разделенными между собой диэлектриком. Изменение размеров пластин, расстояния между ними или между ними и диэлектриком вызывает изменение емкости.

На рис. 5.6 показан принцип действия емкостного пре-

образователя перемещения. В нем емкость изменяется за счет перемещения одной пластины относительно другой (рис. 5.6, а), изменения площади перекрытия пластин (рис. 5.6, б) или перемещения диэлектрика (рис. 5.6, в). Известна также конструкция, при которой диэлектрик, оставаясь неподвижным, изменяет свои характеристики.

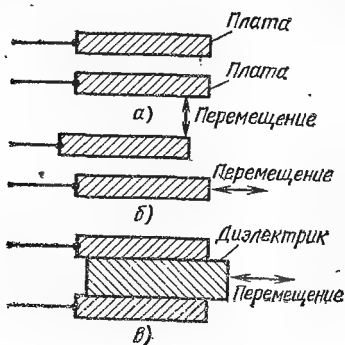


Рис. 5.6. Принципы действия емкостного преобразователя перемещений

На этом принципе основаны емкостный датчик приближения и емкостный выключатель приближения, способные обнаруживать цель на некотором расстоянии от прибора. Этот же принцип заложен в емкостный измерительный преобразователь уровня жидкости, где в результате изменения уровня жидкости варьируется диэлектрическая постоянная.

Индуктивные преобразователи перемещения

Самоиндукция катушки изменяется по мере приближения к ней магнитопроницаемого тела, поэтому перемещение тела относительно катушки можно определить

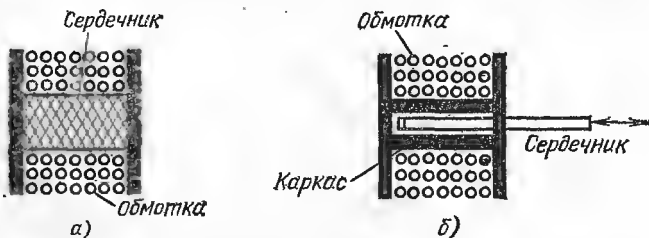


Рис. 5.7. Индуктивные преобразователи перемещения:

а — бесконтактный; б — связанный

с помощью чувствительной катушки с самоиндукцией. Измерительные преобразователи, в которых используется этот принцип, являются обычно бесконтактными (рис. 5.7, а). Кроме того, существуют и связанные индуктивные преобразователи перемещений (рис. 5.7, б), в которых сердечник катушки механически связан с телом, перемещение которого измеряется. Бесконтактные преобразователи описываемого типа применяются в качестве базы для построения индуктивных датчиков приближения и индуктивных выключателей приближения.

Магнитные измерительные преобразователи перемещений

Преобразователи этого типа основаны на принципе изменения магнитного сопротивления между двумя или более магнитными катушками, возбуждаемыми переменным током, в зависимости от перемещения тела. Последнее обстоятельство вызывает изменение выходного напряжения преобразователя. Преобразующий элемент выполняется таким образом, чтобы его можно было использовать в различных типах приборов, в которых осуществляется преобразование измеряемой физической величины в перемещение. Таким образом определяется измеряемая величина.

У дифференциального трансформатора с линейно изменяющимся выходным сигналом три катушки намотаны вдоль одной и той же оси, центральная катушка является первичной. При возбуждении первичной катушки переменным током, когда сердечник движется внутрь катушек, изменяется связь между первичной и вторичными катушками. В результате на выходе вторичных обмоток изменяются значение и фаза напряжения.

На рис. 5.8, а показаны напряжение и фаза на выходе дифференциального трансформатора. Напряжение равно нулю, когда сердечник находится в центральном или нулевом положении. Выходная характеристика прибора является фактически нелинейной, но обычно считается линейной в центральной области перемещения сердечника (имеет нелинейность менее 1 %). С помощью дифференциального трансформатора можно измерять перемещения от нескольких миллиметров до метра. Аналогичным образом работает и дифференциальный трансформатор с угловым изменением выходного напряжения. Он позволяет измерять углы в диапазоне $\pm 40^\circ$.

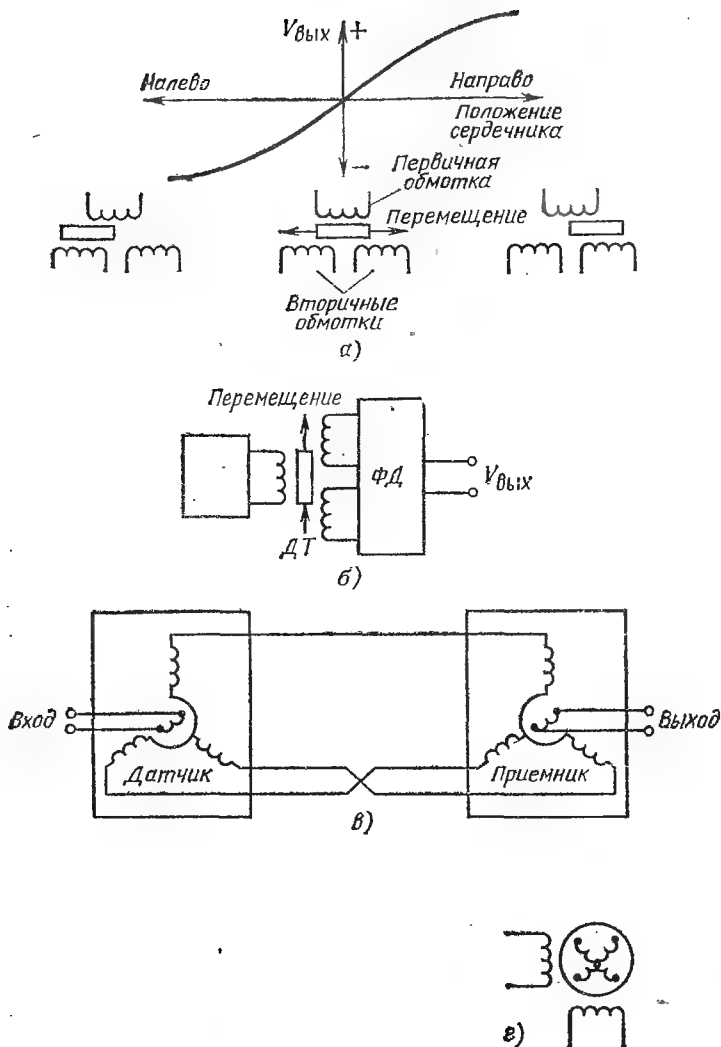


Рис. 5.8. Магнитные измерительные преобразователи перемещений: а — дифференциальный трансформатор с линейно изменяющимся выходом (ДТ); б — использование фазочувствительного детектора (ФД) вместе с дифференциальным трансформатором; в — сельсин; г — вращающийся синусно-косинусный преобразователь

К сожалению, дифференциальные трансформаторы основываются на получении выходного напряжения переменного тока и соответствующей фазы этого напряжения. Поэтому они применяются, как правило, вместе с фазочувствительными детекторами (см. рис. 5.8, б), у которых на выходе получается напряжение постоянного тока: положительное, когда сердечник находится по одну сторону от нулевого положения, и отрицательное, когда он перемещается в другую сторону. Выходное напряжение равно нулю, если сердечник находится в центральном положении.

Некоторые дифференциальные трансформаторы используются совместно с внутренними генераторами, детекторами, фильтрами и усилителями, которые позволяют применять преобразователи с возбуждающим напряжением постоянного тока. На выходе у них получается выпрямленное напряжение постоянного тока. Такие приборы позволяют пользователям применять их с обычными преобразователями.

У сельсина одиночная первичная обмотка ротора поворачивается вместе с перемещением измеряемого объекта. Три статорные вторичные обмотки, расположенные друг к другу под углом 120° , формируют выходную обмотку. Переменный ток возбуждает ротор (этот ток называют опорной частотой) и индицирует выходной сигнал на трех вторичных обмотках. Соотношение между выходами соответствует положению ротора.

Обычно сельсинные системы для измерения перемещений имеют в своем составе два идентичных узла: передающий сельсин (так называемый сельсин-датчик) и сельсин-приемник (сельсин-трансформатор или трансформатор для питания цепей управления). Оба сельсина соединяются по схеме, показанной на рис. 5.8, в, так, чтобы перемещение ротора сельсина-датчика вызвало поворот ротора сельсина-приемника на один и тот же угол.

Поэтому сельсин-приемник может быть использован как база для индикаторных приборов — положение его ротора отображает угловое перемещение объекта измерений. Кроме того, он применяется для выполнения некоторой механической работы. В этом случае сельсин-приемник называется сельсином крутящего момента. В измерительных системах для выработки управляющих

сигналов сельсин-датчик больше известен под названием управляющего сельсина.

Принцип действия сельсинов используется также и в индуктосинах — преобразователях для измерения линейных перемещений, в которых плоский статор вторичной обмотки, содержащий образец проводника в форме линейной «шкалы», сканируется с помощью двух головок (первичных обмоток).

Вращающийся синусно-косинусный преобразователь (рис. 5.8, г) представляет собой сельсин, но только с двумя статорными (на этот раз первичными обмотками, сдвинутыми относительно друг друга на 90°) и двумя роторными обмотками (в этом случае вторичными, которые также сдвинуты на 90° относительно друг друга). Когда этот прибор применяется только как преобразователь перемещения, чтобы выдавать измерительный сигнал в систему, одна из обмоток ротора закорачивается.

Выключатели и приборы для определения приближения

Контактные и бесконечные выключатели можно эффективно использовать в качестве преобразователей для регистрации положения объектов. Простейшим из этих преобразователей является микровыключатель, работающий с использованием слабой физической связи между ним и объектом, положение которого он определяет. Что касается приборов приближения, то они не имеют физической связи с объектами. О присутствии тела они судят с помощью того или иного принципа обнаружения, реализуемого в соответствующих преобразователях.

В индуктивном датчике приближения используется настроенный генератор. Когда проводящее тело приближается к датчику, происходит затухание колебаний, воспринимаемое схемой сопряжения. Более общими и простыми устройствами являются индуктивные выключатели приближения, в которых с помощью интерфейсной схемы производится их включение или выключение при приближении к ним проводящего тела.

Емкостные датчики приближения выполняются либо в форме измерительных преобразователей, либо в форме выключателей. Их принцип действия состоит в том, что находящееся рядом тело изменяет диэлектрическую проницаемость конденсатора, вследствие чего происходит

разбаланс моста, в одном из плеч которого размещается указанный конденсатор. Емкостные приборы дороже индуктивных, однако они способны воспринимать приближение тел, выполненных из различных материалов в более широком диапазоне расстояний.

Имеется также большое число оптических приборов для определения приближения. Они состоят из базового чувствительного элемента и схемы его сопряжения с измерительной системой. В рассматриваемых приборах реализуются два способа определения приближения: прямой (непосредственный) или сканирование и отражение (рис. 5.9). Отражающие приборы могут быть ретро-

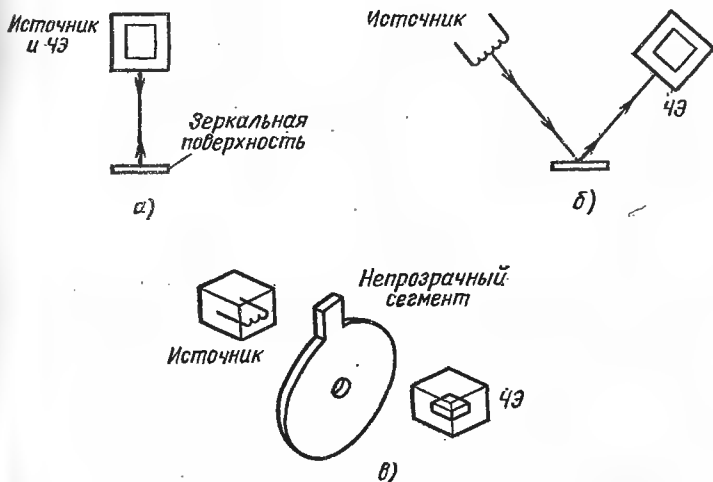


Рис. 5.9. Принципы действия оптических приборов для определения приближения

рефлективными (рис. 5.9, а), когда источник света и чувствительный элемент размещаются вместе, а излучаемый свет отражается обратно и проходит вдоль того же пути, что и падающий. В зеркальном приборе (рис. 5.9, б) луч от источника и отраженный луч света находятся под некоторым углом друг к другу и отражаются от поверхности тела как от зеркала. В диффузных приборах используется прохождение света через матовую поверхность тела (рис. 5.9, в).

Магнитные преобразователи приближения являются

весьма распространенными приборами и имеют в своем составе язычковые реле или датчики Холла.

Радиолокационные преобразователи приближения состоят из генератора радиолокационных сигналов и смесителя, в котором происходит взаимодействие отраженного и зондирующего сигналов. При использовании доплеровского эффекта (частота отраженного сигнала отличается от частоты зондирующего сигнала, когда тело движется) частота выходного сигнала смесителя равна нулю, если тело не движется, и отлична от нуля, если оно приходит в движение. Большинство таких преобразователей работают в диапазоне рентгеновского излучения.

Применение указанных приборов не ограничивается только измерением перемещения. Они могут регистрировать и расстояние, а следовательно, и скорость путем определения времени между передаваемым и отраженным импульсами и выполнения необходимых вычислений с результатами этих измерений.

Ускорения и вибрации

Принцип действия, лежащий в основе всех измерительных преобразователей ускорения (часто называемых **акселерометрами**), заключается в том, что ускорение, которому подвергается преобразователь, вызвано силой, действующей на некоторое тело (**сейсмическую массу**), что и приводит его в движение вместе с преобразователем. Сейсмическая масса прикрепляется к пружине (или непосредственно к прибору), которая противодействует ее перемещению. Поэтому масса движется до тех пор, пока сила пружины не уравнивает силу, действующую на массу вследствие ускорения. Измерение перемещения сейсмической массы по отношению к телу позволяет преобразователю производить вычисление и самого ускорения.

На рис. 5.10 показан принцип действия акселерометра с одной сейсмической массой и пружиной, которой она крепится к корпусу прибора, а также измерительной шкалой с преобразователем. В неподвижном состоянии (рис. 5.10, а) масса также неподвижна и на шкале устанавливается нуль. Но если к преобразователю прикладывается ускоряющая сила, то масса стремится остаться в своем первоначальном состоянии вследствие

присущей ей инерции, в то время как тело преобразователя движется. В результате изменяется положение шкалы относительно стрелки, индицирующей значение ускорения.

Большинство преобразователей не столь просты, как рассмотренные выше, хотя используются и такие. Основным недостатком этого преобразователя является то, что он в состоянии производить измерение ускорения только в направлении оси, вдоль которой размещены пружина, масса и шкала. На практике же довольно часто сущест-

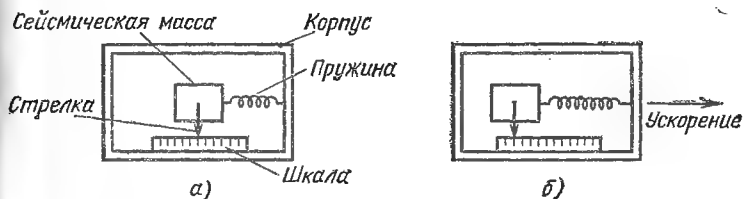


Рис. 5.10. Принцип действия акселерометра

вуют ускорения, действующие более чем по одной оси, и поэтому необходимы преобразователи, способные производить измерения в двух (двухосевые) или трех (трехосевые) направлениях.

Серьезной проблемой здесь является затухание. Если ускорение прикладывается к акселерометру простейшей конструкции, то оно может рассматриваться как ступенчатое возмущение. При этом масса будет колебаться вокруг своего коначного положения, а колебания будут обуславливать задержку измерений во времени. Однако если использовать определенное значение затухания, то удастся получить довольно точные отсчеты результатов за достаточно короткий период времени. Но здесь возникает проблема измерительных преобразователей второго порядка, поскольку такие акселерометры описываются математически дифференциальным уравнением второго порядка в форме

$$a = \frac{d^2 x}{dt^2} + 2b\omega_n \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x.$$

Более подробное объяснение работы таких измерительных преобразователей приведено в гл. 3.

Демпфирование колебаний осуществляется во многих типах акселерометров путем помещения их механизмов в кожух и наполнения его минеральным маслом. Другие методы демпфирования связаны с применением наполненных маслом буферов, электромагнитных или простых воздушных демпферов.

Хотя в различных типах приборов используются все упомянутые принципы преобразования, наиболее распространенными среди них являются тензометрический и пьезоэлектрический.

Тензометрические акселерометры

Если ускорение действует на подпружиненную массу и вызывает ее перемещение, приводящее к изменению размеров одного или нескольких тензометров, то изменение сопротивления этих преобразователей вследствие напряжения будет отображать ускорение.

В акселерометрах могут использоваться все типы тензометрических преобразователей. Автор адресует читателя к началу главы, где в разделе об измерениях деформации и механического напряжения подробно обсуждаются вопросы применения тензометров в измерительных приборах.

Пьезоэлектрические преобразователи

Сейсмическая масса пьезоэлектрического преобразователя действует на пьезоэлектрический кристалл таким образом, что прикладываемое ускорение вызывает его растяжение или сжатие и изменение электрического заряда на нем. Типичная конструкция такого акселерометра показана на рис. 5.11. Круглый кристаллический элемент соединяется с корпусом преобразователя изолированным болтом и шайбами вместе с сейсмической массой. Электрические соединения кристалла выполнены с помощью металлических проводов. Следует заметить, что в этой конструкции не требуется отдельной пружины, так как болт обеспечивает предварительный натяг чувствительного элемента.

Другой способ установки пьезоэлектрического элемента (рис. 5.12) предусматривает наличие центрального стержня, который проходит через него и выполняет роль сейсмической массы. В этой конструкции сам чувстви-

тельный элемент является «пружиной». Преимущество пьезоэлектрического акселерометра по сравнению с другими типами аналогичных преобразователей заключается в том, что малая масса прибора обеспечивается за счет исключения монтажных элементов для крепления чувствительного элемента. С другой стороны, система, изображенная на рис. 5.11, должна быть достаточно прочной и тяжелой, чтобы исключить влияние корпуса прибора на чувствительный элемент через нагруженный болт.

Рис. 5.11. Один из способов установки пьезоэлектрических кристаллических элементов на акселерометре

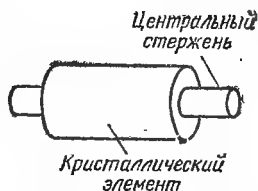
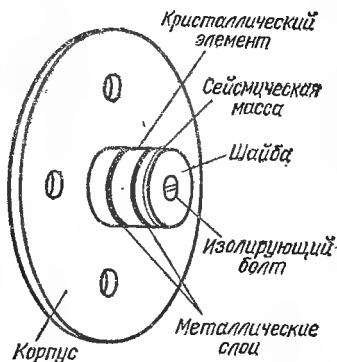


Рис. 5.12. Другой способ установки пьезоэлектрического кристаллического элемента на акселерометре

Высокое выходное сопротивление пьезоэлектрических кристаллических элементов делает их весьма чувствительными к характеристикам соединительных проводов. По этой причине пьезоэлектрические акселерометры выполняются с интегральными усилителями, которые действуют как преобразователи сопротивления.

Сила, масса

Преобразователи, спроектированные для измерения силы, очень часто используются при взвешивании, поэтому их иногда называют динамометрами. Независимо от того, измеряется ли непосредственно сила или сила, обу-

словленная воздействием на неизвестную массу гравитации или некоторой другой силы, например давления, момента, измерения являются косвенными. Обычно измеряемая сила преобразуется в механическое перемещение упругого чувствительного элемента. Тогда перемещение этого элемента измеряется с помощью определенных преобразователей. Наиболее распространенным принципом преобразования является пьезорезистивный, который используется в тензометрах.

Чувствительные элементы

В измерительных преобразователях силы применяют следующие типы чувствительных элементов: консоли, цилиндры, диафрагмы и прочные кольца. На рис. 5.13 показан принцип действия чувствительного элемента с консолью, в котором последняя крепится либо двумя (рис. 5.13, а), либо одним концом (рис. 5.13, б), а сила

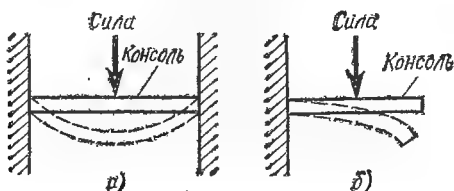


Рис. 5.13. Чувствительный элемент с консолью

прикладывается перпендикулярно продольной оси консоли. Отклонение консоли от своего первоначального положения и служит мерой прикладываемой к ней силы.

На рис 5.14 показан принцип действия чувствительного элемента цилиндрического типа, в котором сила прикладывается вдоль оси цилиндра. Цилиндр изгибается, когда прикладывается усилие, и этот изгиб или отклонение стенок цилиндра от своего первоначального положения и характеризует значение приложенной силы.

Чувствительный элемент в форме диафрагмы (рис. 5.15) включает в себя круглую пластинку, зажатую по краям. Ее принцип действия напоминает работу консоли в рассмотренном ранее чувствительном элементе,

Диафрагма прогибается в центре при приложении к ней силы, а по ее отклонению от исходного состояния измеряется прикладываемая к ней сила. Чувствительные элементы в форме диафрагмы находят наибольшее распространение в измерительных преобразователях давления,

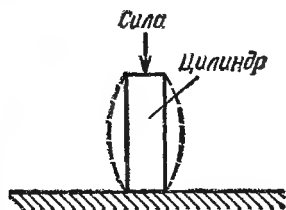


Рис. 5.14. Чувствительный элемент цилиндрического типа

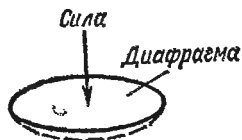


Рис. 5.15. Чувствительный элемент диафрагменного типа

где прикладываемое усилие создается за счет давления газа или другой среды. Подобные приборы более подробно описываются в гл. 6.

Прочное кольцо как элемент измерительного преобразователя силы (рис. 5.16) может быть круглым или

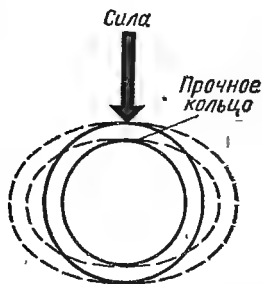


Рис. 5.16. Чувствительный элемент в форме прочного кольца

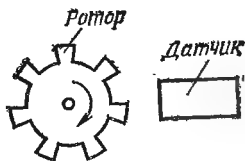


Рис. 5.17. Принцип действия импульсного тахометра

прямоугольным (в этом случае оно называется испытательной рамкой). Прикладываемое усилие искажает форму кольца, а по степени искажения определяется значение силы.

Преобразователи этого типа используются для измерения линейной или угловой скорости. Измерители угловой скорости являются, как правило, электромагнитными устройствами и называются тахометрами. Тахометры электрооптического типа называются стробоскопами. Линейная скорость определяется обычно косвенным методом путем преобразования линейной скорости во вращение маховика или шестеренки. Затем угловая скорость измеряется с помощью углового измерительного преобразователя. Непосредственное определение линейной скорости обеспечивается электромагнитными преобразователями с малым перемещением чувствительного элемента либо бесконтактным доплеровским микроволновым радиолокационным преобразователем.

Ранее рассмотренные приборы, регистрирующие приращения, также могут быть использованы в качестве измерительных преобразователей скорости: частота следования импульсов от соответствующих чувствительных сегментов будет пропорциональна скорости.

Импульсные тахометры

Наиболее распространенным способом преобразования является такой, в котором приемная катушка известной конструкции позволяет определять частоту вращения вала. Обычно такой вал выполняется с выемками или выступами, образуя тем самым шестеренчатое колесо (рис. 5.17). Когда выступ или выемка проходит через приемную катушку, изменяется выходное напряжение. Подсчет изменений выходного напряжения в течение определенного временного интервала и дает значение угловой скорости.

В импульсных тахометрах могут быть использованы, например, эффект Холла, индуктивные вихревые токи, оптические явления (в преобразователях приближения), но наиболее распространенным является электромагнитный принцип.

Ферромагнитный ротор с воспринимающим элементом выполняется здесь в виде постоянного магнита или катушки. Магнит создает магнитное поле вокруг чувствительного элемента. Когда зубец ротора пересекает поле, изменяется магнитный поток и индуцируется ЭДС

в катушке. Преимуществом этого принципа преобразования является зависимость выходного сигнала от конфигурации зубцов ротора. Некоторые виды выходных импульсов для различных форм зубцов роторов приведены на рис. 5.18.

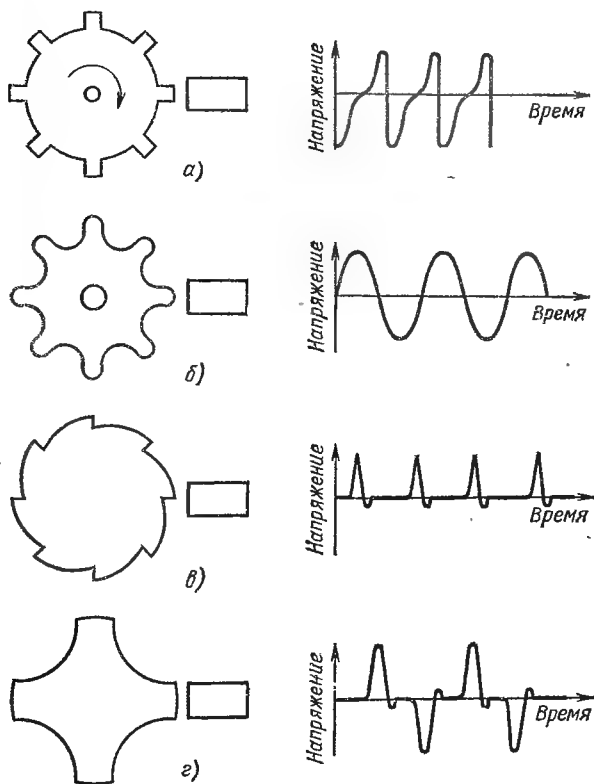


Рис. 5.18. Зависимость выходного сигнала электромагнитного импульсного тахометра от конфигурации зубцов ротора:

а — грубые зубцы; *б* — точно обработанные зубцы; *в* и *г* — специальная форма зубцов

Тахометрические генераторы

Когда измеряемая скорость воздействует на тот или иной генератор, по амплитуде или частоте его выходного напряжения можно судить об угловой скорости. Ге-

нераторы, используемые для этих целей, называются тахогенераторами.

Одна из проблем, которая возникает при использовании тахогенераторов, — это необходимость подачи энергии для питания преобразователя. От движущегося тела должна отбираться для измерительного устройства столь малая энергия, чтобы исключалось влияние тахогенератора на угловую скорость вращения вала.

Стробоскопы

Стробоскопы представляют собой электрооптические тахометры специального типа, в которых вспышками света освещается вращающийся вал. Скорость вспышек регулируется вручную до тех пор, пока изображение вала не станет стационарным. Это происходит тогда, когда каждая вспышка приходится на один оборот вала.

ГЛАВА 6

ИЗМЕРЕНИЕ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

В этой главе подробно рассматриваются способы измерения механических свойств жидкостей и газов: расхода, влажности, уровня и давления.

Расход

Термин *расход* обозначает перемещение текущей среды — жидкости или газа. *Расходомеры* — это преобразователи, которые используются для измерения потока. Они регистрируют скорость и расход жидкого или газообразного вещества за заданный период времени.

1. **Массовый расход** представляет собой массу вещества, протекающего в единицу времени, и измеряется, например, в $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$.

2. **Объемный расход**, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, равен объему вещества, протекающего в единицу времени.

3. **Скорость потока** измеряется в $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

В большинстве измерений речь идет об объемном расходе, а массовый расход может быть определен путем вычислений, хотя при этом следует учитывать изменения давления, плотности, температуры и др. (особенно при

измерениях расхода газа). По аналогии измерения скорости потока служат основой для определения массового или объемного расхода.

Механические средства измерения расхода

На практике известно довольно много методов определения расхода. Простейшими и поэтому наиболее распространенными из них являются методы с использованием механических чувствительных элементов, в которых

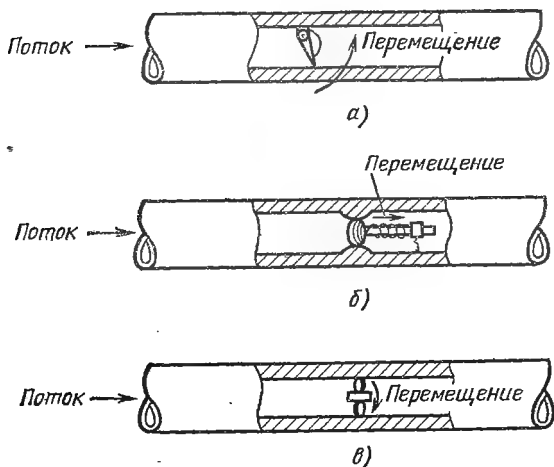


Рис. 6.1. Типовые методы механического измерения расхода

поток перемещает или вращает твердое тело. Таким образом это перемещение или вращение тела оказывается пропорциональным расходу.

На рис. 6.1 показаны основные механические методы измерения расхода. В частности, на рис. 6.1, а изображена нагруженная пружиной и подвешенная на шарнире лопасть, которая отклоняется, открывая отверстие, когда текучая среда проходит через преобразователь. Чем больше расход, тем сильнее открывается отверстие, т. е. тем больше отклоняется лопасть.

На рис. 6.1, б показан преобразователь, в котором используется тот же самый метод, но с ограниченной пружиной заглушкой. Возможны и другие разновидности

сти воплощения этого метода. В преобразователе на рис. 6.1, в реализован метод пропеллера, вращающегося при протекании вещества. Причем частота вращения пропеллера пропорциональна расходу этого вещества.

Наиболее распространенным механическим преобразователем расхода является турбинный расходомер с вращающимся пропеллером (или в данном случае турбинкой). На рис. 6.2 представлены основные части типового турбинного расходомера, в котором турбинка устанавливается в потоке вещества с помощью подшип-

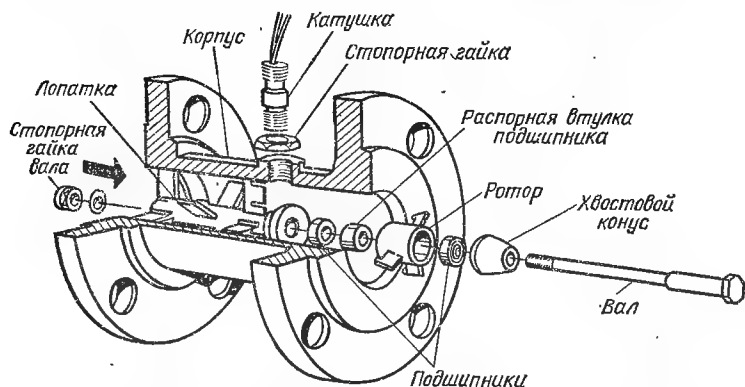


Рис. 6.2. Турбинный расходомер, в котором турбинка вращается под напором потока жидкости

ников. В общем случае лопасти турбинки выполняются из ферромагнитного материала. Поэтому катушка, укрепленная на корпусе расходомера, используется для определения частоты вращения турбинки. Электромагнитный чувствительный элемент создает эффект торможения турбины, что при низких скоростях протекания вещества может сказываться на угловой скорости вращения турбинки. При измерениях малых расходов применяются другие конструкции чувствительных элементов, например электрооптические.

При точных измерениях важно, чтобы не происходило завихрения протекающего вещества, поскольку это напрямую сказывается на частоте вращения турбинки. Поэтому спрямляющие поток лопатки устанавливаются обычно на входе расходомера. Эти лопатки формируют также одну из опорных точек турбинки. Конечно, воз-

можны и существенно более простые конструкции расходомеров, когда точность измерений не существенна, т. е. если торможение и завихрение потока можно не учитывать.

Одним из преимуществ турбинных расходомеров по сравнению с расходомерами других типов является линейная зависимость их выходного сигнала от скорости потока в установленном для прибора диапазоне.

Измерение расхода на основе перепада давлений

Если жидкость или газ нагнетаются через некоторое препятствие в трубопроводе, то изменение их скорости вызывает перепад давления, пропорциональный расходу. Измерив перепад давлений (для этого обычно используется измерительный преобразователь перепада давлений), можно определить расход вещества.

Наиболее распространенным типом расходомеров на основе перепада давлений или расходомеров с изменяющимся давлением является трубка Вентури (рис. 6.3, а), в которой текучее вещество проходит как бы через горлышко бутылки, вставленное в трубопровод. В Британском стандарте BS1042 содержатся данные о предпочтительных размерах трубок Вентури для определения расходов в различных диапазонах измерений.

Другим весьма распространенным расходомером на основе перепада давлений является трубка Пито (рис. 6.3, б), в которой трубка датчика вводится через стенку основного трубопровода и направляется своим отверстием непосредственно навстречу потоку жидкости или газа. Этот датчик играет роль ударного зонда. Второй зонд (статический датчик) размещается непосредственно в стенке трубопровода. Разность ударного и статического давлений и определяет расход. На рис. 6.3, в показан преобразователь с измерительной диаграммой, а на рис. 6.3, г — с секцией центрифуги. Принципы их работы аналогичны описанным выше.

Недостаток рассмотренных приборов состоит в том, что скорость потока оказывается пропорциональной квадратному корню из перепада давлений, т. е. эти приборы являются существенно нелинейными. Эти преобразователи также не могут быть использованы для измерения расхода газа, поскольку их принцип действия основан на том факте, что вещество является несжимаемым при

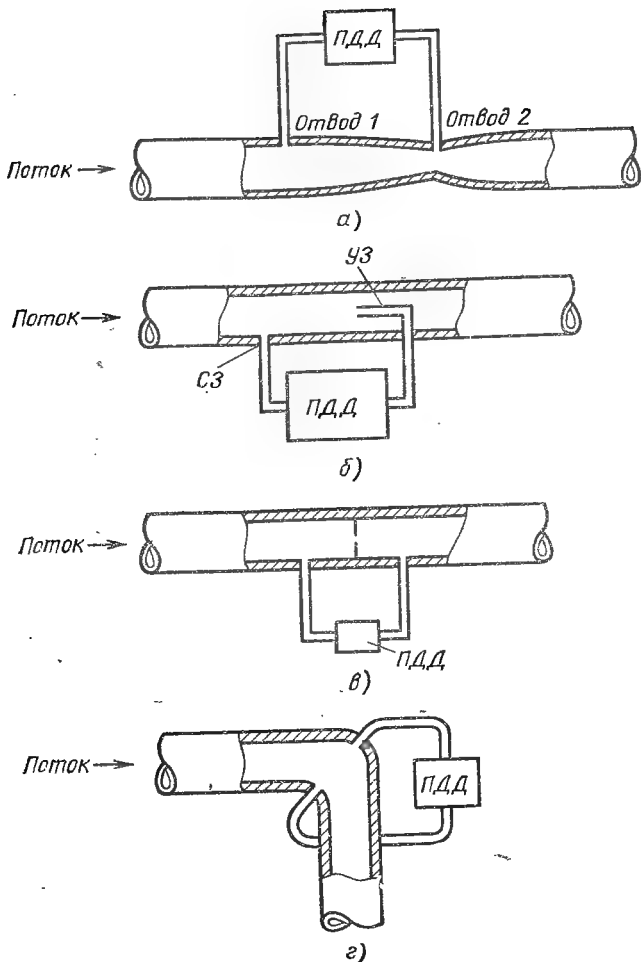


Рис. 6.3. Разновидности расходомеров на основе перепада давлений: УЗ — ударный зонд; СЗ — статический зонд; ПДД — измерительный преобразователь дифференциального давления

прохождении узких участков в трубопроводе. Газы, к сожалению, сжимаемые вещества, поэтому требуется вносить соответственные коррекции в показания приборов.

Измерение расхода на основе термальных явлений

Термальные расходомеры работают на принципе пропорциональности тепла, переносимого веществом от одной точки к другой, массовому расходу этого вещества. На рис. 6.4, а показано, как два измерительных преобразователя температуры (ИПТ) определяют температуру вещества до и после нагревания, которое осуществляет нагревательный элемент, расположенным между этими преобразователями.

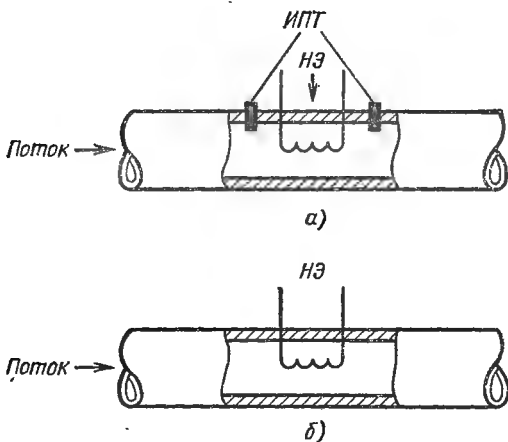


Рис. 6.4. Способы реализации термального принципа измерения расхода с использованием нагревательного элемента (НЭ)

Термоанемометры измеряют расход вещества с помощью одиночного нагревательного элемента, расположенного в его потоке (рис. 6.4, б). Охлаждающий эффект протекающего через этот элемент вещества характеризует массовый расход, т.е. охлаждение индицируется благодаря изменению сопротивления проводов нагревательного элемента. Часто вместо проволочного элемента в преобразователе используется металлическая пленка. С помощью термоанемометра удастся измерять чрезвычайно быстрые флуктуации расхода вещества.

Электромагнитный метод измерения расхода

Если проводящая жидкость протекает через переменное магнитное поле, то в ней возникает электродвижущая сила, которая пропорциональна скорости потока. На рис. 6.5 показан принцип действия электромагнитного расходомера.

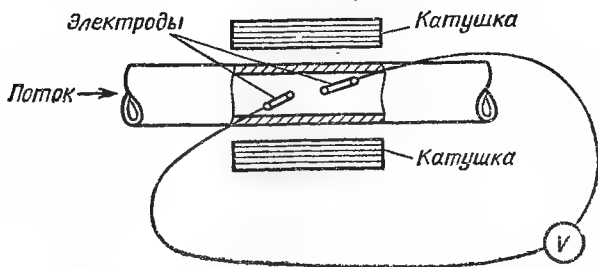


Рис. 6.5. Принцип действия электромагнитного расходомера

Для измерения расхода этим методом можно использовать даже плохо проводящие жидкости. Электромагнитные расходомеры не имеют движущихся частей. Безударные приборы такого типа применяются не только для измерения расхода жидкостей, но и суспензий.

Измерение расхода путем генерирования завихрений в протекающем веществе

Любое препятствие в трубопроводе создает завихрение в потоке вещества (рис. 6.6), пропорциональное его объемному расходу. В преобразователях используются два способа генерирования завихрений: **вынужденные колебания** (рис. 6.6, а), при которых поток вещества вращается или прецессирует вдоль оси трубопровода в виде некоторой спирали, и **естественные колебания** (рис. 6.6, б), при которых стабильные структуры (известные как «уличные» вихри фон Карманна) периодических вращающихся в разные стороны вихрей возникают в потоке за препятствием.

В расходомерах с генерированием вынужденных колебаний обычно используют пьезоэлектрические преобразователи для определения числа прецессий, проходя-

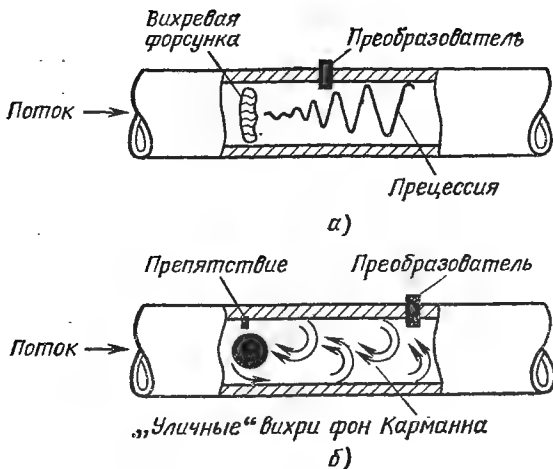


Рис. 6.6. Принцип действия преобразователей, создающих вихрь в потоке вещества

щих через конкретную точку трубопровода. В расходомерах с естественными колебаниями вещества применяются тензометрические преобразователи силы или ультразвуковые средства для определения периодических изменений силы, происходящих при вихревом движении вещества.

Ультразвуковой метод измерения расхода

Ультразвуковые приборы можно применять не только в качестве преобразователя в расходомерах с генерированием естественных колебаний вещества, но и непосредственно для измерения расхода. Причем для этого существуют различные способы. Например, измеряют время, затрачиваемое на прохождение ультразвуковым импульсом через вещество, или прибегают к эффекту Доплера, при котором частота колебаний на входе приемника ультразвукового излучения изменяется в зависимости от скорости жидкости или газа.

Измерение давления

Преобразователи для измерения давления работают на известном механическом принципе, связанном с приложением эластичного узла из материала, который реагирует на перемещение, когда на него воздействует давление.

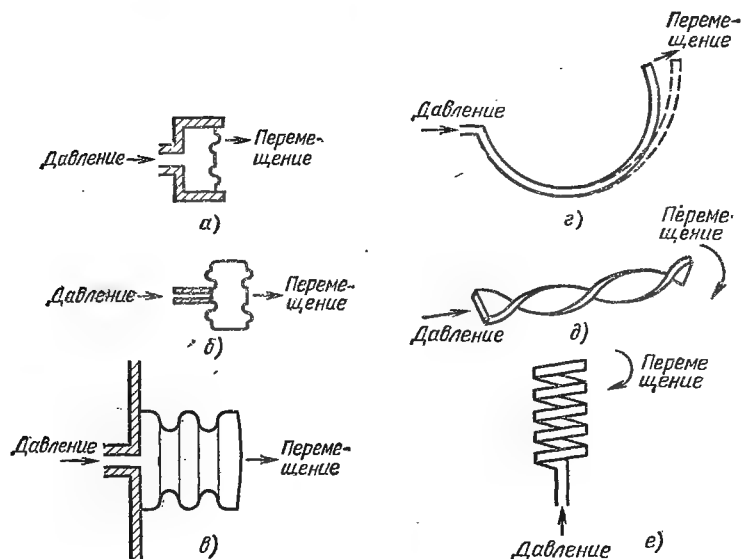


Рис. 6.7. Устройства для измерения давления:

а — диафрагма; б — анероидная коробка; в — сильфон; г — одиночная трубка Бурдона; д — двойная трубка Бурдона; е — спиральная трубка Бурдона

Измерение перемещения (или напряжения, возникающего в материале под действием давления) позволяет определить давление. Типовые устройства для измерения давления показаны на рис. 6.7.

На рис. 6.7, а изображена диафрагма, которая смонтирована так, что измеряемое давление действует только на одну ее сторону. Диафрагма может быть гофрированной (как показано на рисунке) или плоской. Если две гофрированные диафрагмы устанавливаются задними сторонами друг к другу (рис. 6.7, б) и измеряемое давление подводится к их середине, то образуется весьма эффективный чувствительный элемент, называемый

анероидной коробкой. На рис. 6.7, *в* показан сильфон. Наконец, на рис. 6.7, *г—е* приведены различные виды трубок Бурдона, которые перемещаются при приложении к ним давления.

Различают абсолютное, разностное и избыточное давление. Абсолютным называется давление вещества относительно вакуума. Разностное, или дифференциальное, давление определяется относительно некоторого ненулевого опорного давления. Избыточное давление измеряется относительно атмосферного давления. В действительности все методы определения давления являются относительными, поскольку всегда измеряется разность давлений между двумя сторонами чувствительного элемента. Поэтому нетрудно установить, какой тип давления (абсолютное, дифференциальное или избыточное) показывает измерительный преобразователь. В любом из них фиксируется давление на одной стороне чувствительного элемента по отношению к вакууму, другому сравниваемому давлению или давлению окружающей атмосферы.

На рис. 6.8, *а* показано, как можно измерить абсолютное, на рис. 6.8, *б* — дифференциальное, а на рис. 6.8, *в* — избыточное давление. Разработчик измерительных преобразователей самостоятельно выбирает необходимый способ определения давления.

Тензометрические преобразователи давления

Соединение тензометра с чувствительным элементом позволяет получить непосредственно измерительный преобразователь давления. Если чувствительный элемент круглый, то применяется тензометр розеточного типа, хотя может быть использован и иной.

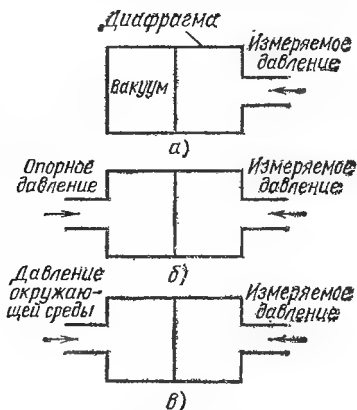


Рис. 6.8. Адаптирование простого преобразователя давления для измерения абсолютного давления (*а*), разностного давления (*б*) и избыточного давления (*в*)

Тонкопленочные тензометры дают возможность конструировать прочные преобразователи, а соединение чувствительных элементов с полупроводниковыми или интегральными диффузионными тензометрами обеспечивает хорошие динамические свойства и высокую точность измерительных приборов.

Емкостные преобразователи давления

Одной из основных конструкций емкостного преобразователя давления является одностаторная, в которой чувствительный элемент (обычно диафрагма) образует одну пластину конденсатора и перемещается относительно его другой, неподвижной пластины (рис. 6.9, а). В двухстаторной конструкции диафрагма перемещается между двумя неподвижными пластинами (рис. 6.9, б).

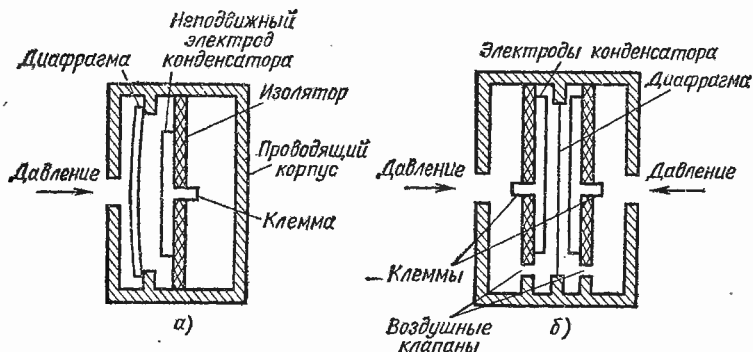


Рис. 6.9. Емкостные преобразователи давления

При измерениях переменного давления газа можно использовать в качестве преобразователя простой емкостный микрофон. Частотный диапазон является важнейшей характеристикой этих приборов, некоторые из них могут работать в интервале частот от 0 до 200 кГц и более.

Магнитные преобразователи давления

Основным элементом магнитных преобразователей является дифференциальный трансформатор с линейно изменяющимся выходом. По существу, преобразова-

тель — это простой механический чувствительный элемент, перемещение которого измеряется упомянутым трансформатором (рис. 6.10). В качестве чувствительных элементов используется анероидная коробка, сильфон или трубка Бурдона.

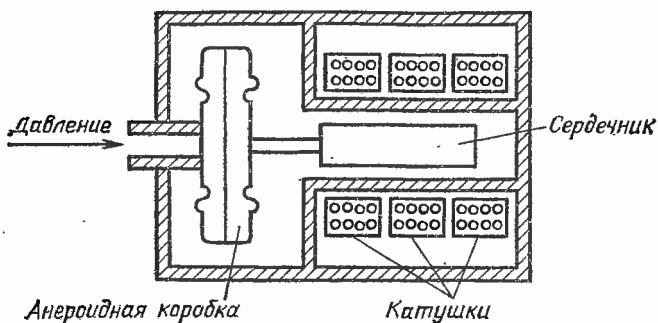


Рис. 6.10. Использование дифференциального трансформатора с линейно изменяющимся выходом в качестве преобразовательного элемента в магнитном измерительном преобразователе давления

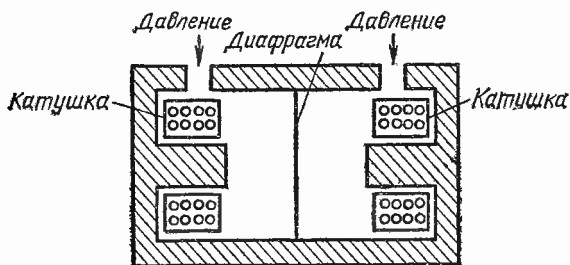


Рис. 6.11. Преобразователь давления с индуктивным мостом из двух катушек

Иногда применяется и другой метод магнитного преобразования давления, при котором формируется двухкатушечный индуктивный мост (рис. 6.11). Одиночная диафрагма разделяет две катушки, так что при перемещении диафрагмы индуктивность одной катушки уменьшается, а другой увеличивается.

Переключатели давления

Часто не требуется измерять давление, необходимо только производить переключение прибора, когда давление достигает определенного значения или превышает его.

Типичной областью применения таких приборов являются прежде всего современные автомобили, в которых чувствительные элементы для измерения давления применяются для регулировки давления масла. Если возникает утечка масла, то его давление падает и переключатель включает световой сигнал на приборной доске, предупреждая водителя о неисправности. Другой пример использования переключателей давления — фиксация стадий производства (технологического процесса). Здесь применяются несколько выключателей, что дает возможность пользователю устанавливать необходимое число фиксируемых значений давления.

Влажность

Чувствительные элементы, у которых в зависимости от влажности изменяются некоторые свойства, используются в измерительных преобразователях влажности. Простейший чувствительный элемент выполняется в виде гигроскопического элемента (поглощающего молекулы воды), плотно прижимаемого пружинным устройством. Любая абсорбция или десорбция изменяет длину элемента, и каждая маркированная точка устройства перемещается в одном или другом направлении в зависимости от уровня абсорбции. Это перемещение затем воспринимается прибором с помощью одного из известных принципов преобразования. Хотя наиболее распространенными являются неорганические чувствительные элементы, иногда применяются и органические, даже человеческая кожа.

В резистивных гигроскопических элементах используется их свойство изменять свое сопротивление при колебаниях влажности. Они представляют собой проводочные элементы, покрытые водным раствором соли. Слой соли изменяет свое сопротивление в зависимости от местной влажности. Могут быть сконструированы гигроскопические элементы, у которых при колебаниях влажности варьируется поверхностное сопротивление (напри-

мер, элемент Попе, включающий в себя полистерин, обработанный серной кислотой).

Гигрометрические элементы на основе окиси алюминия с изменением влажности изменяют не только свое сопротивление, но и емкость. Конструктивно такой элемент представляет собой алюминиевую подложку, формирующую одну обкладку конденсатора, со слоем окиси алюминия и тонким слоем золота (достаточно тонким, чтобы иметь поры), формирующим другую его обкладку. Структура окиси алюминия такова, что этот слой является пористым и впитывает пары воды, вследствие чего изменяется диэлектрическая постоянная и, следовательно, емкость конденсатора.

Если кварцевый кристалл покрыть гигроскопическим материалом, то его резонансная частота будет зависеть от влажности, поскольку влажность влияет на общую массу кристалла.

Уровень

Определение уровня жидкости в целях проведения необходимых переключений представляет собой относительно простую — так называемую дискретную — задачу (в отличие от задачи непрерывного измерения уровня, которая будет рассматриваться ниже). Самым известным ее примером может служить обычный поплавковый кран в сливной бачке туалета, который просто перекрывает клапан и прекращает подачу воды, когда поплавковый шар поднимается достаточно высоко, чтобы перекрыть клапан.

В терминах электроники это означает, что преобразователь выдает один бит информации: когда поплавок поднимается выше определенной точки, переключатель закрывается. Довольно часто переключающее устройство представляет собой «гребенку» переключателей, установленных на корпусе преобразователя, и постоянный магнит, смонтированный на поплавке. Известны и другие конструкции описанных преобразователей уровня.

Поплавковые преобразователи применяются в основном для непрерывного определения уровня, когда положение поплавка вызывает изменение какого-либо параметра преобразующего элемента. Поэтому их выходной сигнал отображает текущее значение уровня, а не превышение некоторого фиксированного значения. Блок из-

мерения уровня топлива в топливном баке автомобиля является хорошим примером такого преобразователя, в котором положение поплавка определяет значение переменного сопротивления чувствительного элемента.

Определение уровня путем измерения проводимости

Если электроды поместить в жидкость, уровень которой измеряется, то изменение проводимости будет отражать ее уровень. Причем ток через жидкость должен быть достаточно малым, чтобы исключить возможность электролиза или взрыва. Конечно, этот метод может быть реализован лишь при измерении уровня электропроводящей жидкости.

Емкостной метод определения уровня жидкости

При реализации этого метода электроды также погружены в жидкость, но последняя используется как диэлектрик между двумя электродами, которые образуют конденсатор (рис. 6.12). Изменение уровня жидкости означает, что изменяется диэлектрическая постоянная и, следовательно, емкость преобразователя. К сожалению, емкостные преобразователи могут применяться для измерения уровня лишь не проводящих электрический ток жидкостей.

Когда емкость, где находится жидкость, выполнена из металла, ее можно использовать в качестве одного из электродов преобразователя.

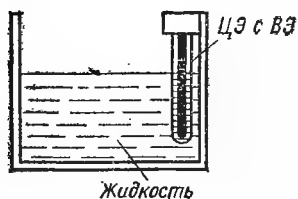


Рис. 6.12. Емкостный метод определения уровня жидкости:

ЦЭсВЭ — цилиндрический электрод с маленьким внутренним электродом

Фотоэлектрический метод определения уровня жидкости

В общем случае фотоэлектрические методы применяются только для определения дискретных уровней жидкости. На рис. 6.13 показаны основные методы определения уровня жидкости. На них основана работа преобразователей фотоэлектрического типа. В первом методе используются физически разделенные фотоэлектрические источники и детекторы. Поэтому луч между ними

прерывается, когда уровень жидкости превышает высоту установки этих приборов (рис. 6.13 а). Практически луч света полностью не прерывается, а лишь существенно ослабляется. В преобразователе используется соответствующая схема сопряжения, которая определяет точку его переключения.

Во втором методе применяются расположенные в одном корпусе источник света, детектор и призма (рис. 6.13, б). Свет от источника претерпевает внутреннее от-

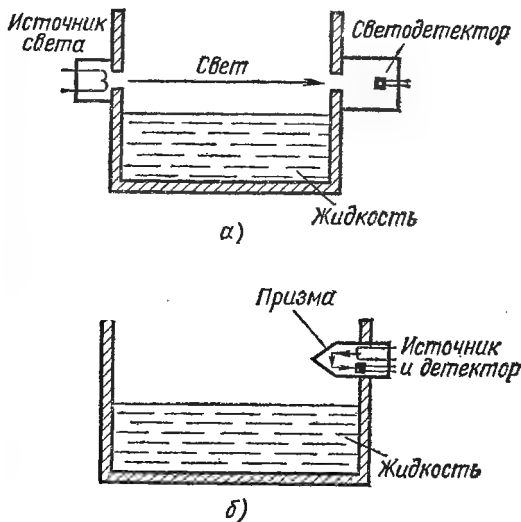
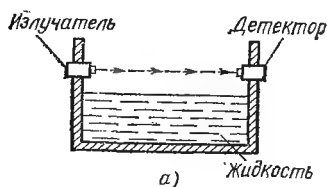


Рис. 6.13. Фотоэлектрические методы определения уровня жидкости

ражение и попадает на детектор, когда корпус преобразователя находится в газовой среде. Как только жидкость покрывает корпус, изменяется индекс отражения между призмой и окружающей средой и луч света уже не отражается к детектору. С технической точки зрения в таких приборах можно использовать не только излучение видимого света, но также ультрафиолетовое и инфракрасное,

Ультразвуковой метод измерения уровня жидкости

Этот метод применяется для измерения как дискретных, так и непрерывных значений уровня. Различают три режима работы ультразвуковых преобразователей уровня. Первый из них напоминает фотоэлектрический метод.



При его реализации излучатель и детектор монтируются в емкости так, что между ними образуется прямой путь волны в газе (рис. 6.14, а). Когда уровень жидкости поднимается и она покрывает преобразователь, ультразвуковые волны существенно поглощаются при прохождении к ранее определенной точке переключения. Так же как и в первом, фотоэлектрическом методе, рассмотренный режим можно использовать лишь для определения дискретных уровней жидкости.

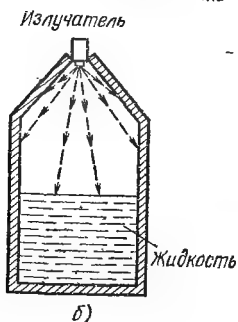
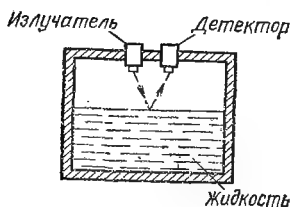


Рис. 6.14. Ультразвуковые методы определения уровня жидкости

Второй метод, основанный на отражении ультразвуковых волн от поверхности жидкости (рис. 6.14, б), применяется для непрерывного измерения уровня. Импульсы излучения попадают на поверхность жидкости, отражаются от нее и поступают в детектор. Промежуток времени между излучением и приемом импульса характеризует расстояние от

поверхности жидкости до преобразователя. При вычислении уровня жидкости принимается в расчет скорость звука в среде между прибором и поверхностью жидкости. В преобразователях излучатель и детектор могут располагаться раздельно (как показано на рисунке) либо в одном корпусе.

Третий метод ультразвукового определения уровня жидкости показан на рис. 6.14, в; в этом случае внутри

емкости размещается эмиттер, излучающий ультразвуковые волны в пространстве над поверхностью жидкости. Ультразвуковые колебания оказываются в резонансе с колебаниями полости над поверхностью жидкости или в резонансе с гармониками собственных колебаний этой полости. При разном уровне жидкости резонансная частота оказывается различной, поэтому путем измерения частоты новых колебаний определяется уровень жидкости.

ГЛАВА 7

АКУСТИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Акустика

Основной измеряемой величиной в акустике является звук, хотя существуют и другие производные от него измеряемые величины. Прежде всего это уровень звукового давления. Кроме них здесь рассматриваются также распространение звука в воде и ультразвуковые колебания.

Звук

В воздухе звук представляет собой простое скопление волн давления, перемещающихся со скоростью приблизительно $322 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (над уровнем моря). Эти волны действуют в любой точке пространства как колебания давления воздуха. Строго говоря, подобные колебания необходимо сопоставлять с диапазоном частот, воспринимаемых человеческим ухом (приблизительно от 30 Гц до 15 кГц), поэтому описанное явление получило название звука.

Воздух — это упругая среда. Звук может распространяться в любой другой упругой среде, но в этих случаях он будет представлять собой не колебания давления, а колебания отдельных частиц, напряжения или плотности. Они имеют различную скорость прохождения в различных средах.

Отсюда следует, что измерения звука в воздухе следует осуществлять с использованием преобразователей давления с частотными характеристиками, подобными характеристике человеческого уха. Такие приборы называются обычно микрофонами.

Уровень звукового давления

Обычно уровень звукового давления в децибелах (дБ)

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{\rho(rms)}{\rho_{ref}(rms)},$$

где $\rho(rms)$ — эффективное давление звука; $\rho_{ref}(rms)$ — опорное давление звука, которое должно устанавливаться до проведения измерений.

Уровень (громкость) звука

Измерение уровня звукового давления включает в себя непосредственно определение давления на всех частотах звука, поэтому указанные уровни давления точно известны на этих частотах. Они представляют собой объективно существующие количественные величины. Однако *громкость звука* есть *взвешенная* величина: сигнал с выхода микрофона проходит через взвешивающую схему, которая выделяет составляющие сигнала определенных частот и подавляет составляющие других частот.

Цель этой операции заключается в том, чтобы приблизить измерения громкости звука в наибольшей степени к его субъективному восприятию человеческим ухом. Сами по себе измерения звукового давления не учитывают и не могут учитывать чувствительности человеческого уха. Характеристики взвешивающей схемы определяются национальными стандартами и обозначаются эталонными буквами (например *A*, *B*, *C*), чтобы их можно было использовать совместно с частотной характеристикой.

Измерители громкости звука и звукового давления выполняются в виде единого переносного блока, содержащего в себе взвешивающую схему, предусилитель и дисплей.

Микрофоны

Звуковое давление изменяется в чрезвычайно широком диапазоне низких частот. Широка также и частотная характеристика звуковых колебаний. Поэтому чувствительные элементы преобразователей должны быть жесткими и иметь малую массу, а также небольшое откло-

нение. Обычно в микрофонах применяются чувствительные элементы в виде плоских диафрагм измерителей давления (см. гл. 6).

Наиболее распространенными типами микрофонов, используемых при звуковых измерениях, являются кристаллические (работающие на пьезоэлектрическом эффекте) и конденсаторные (работающие на емкостном эффекте).

Пьезоэлектрические микрофоны

Диафрагма микрофона механически связана с небольшой керамической пластинкой или кристаллом кварца (рис. 7.1) и воздействует на них так, что появляющийся вследствие пьезоэлектрического эффекта выходной сигнал пропорционален звуку, падающему на диафрагму.

Довольно часто микрофоны оснащаются интегральными предусилителями, которые используются в качестве

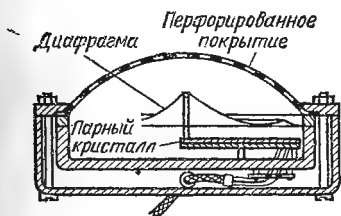


Рис. 7.1. Пьезоэлектрический микрофон

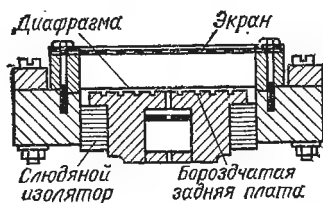


Рис. 7.2. Внутреннее устройство типового конденсаторного микрофона

преобразователей сопротивления для того, чтобы получить более низкое выходное сопротивление (порядка 100—1000 Ом), чем дает кристалл (мегаомы). Это позволяет инженеру обеспечить допустимый уровень помех в системах с длинными линиями передачи информации. Мощность для питания предусилителя может поступать от самой измерительной системы или от интегральной ячейки, расположенной в корпусе микрофона.

Конденсаторные микрофоны

Базовая конструкция конденсаторного микрофона изображена на рис. 7.2. Здесь диафрагма, электрически соединенная с корпусом микрофона, выполняет роль

чувствительного элемента для восприятия звукового давления. Она образует один электрод конденсатора. Задняя плата формирует второй электрод конденсатора.

У этого микрофона электроды должны быть заряжены, для чего используется постоянное напряжение порядка 200 В от отдельного источника питания. В некоторых типах конденсаторных микрофонов аналогичная проблема решается за счет расположения между электродами поляризованного диэлектрика. Последний называется электретом, и поэтому такие конденсаторные микрофоны соответственно называются электретными. Они, как правило, оснащаются предусилителями на основе интегральных полевых транзисторов, питающихся от малогабаритных интегральных ячеек. Эти предусилители работают как преобразователи сопротивления (см. предыдущий раздел о пьезоэлектрических микрофонах).

Гидрофоны

В воде звук измеряется с помощью специальных микрофонов — гидрофонов. Наибольшую популярность получили пьезоэлектрические гидрофоны, которые по своей конструкции напоминают пьезоэлектрические микрофоны.

Местоположение источника звука может быть установлено двумя или более микрофонами, а сам этот процесс называется провешиванием. Часто используются два гидрофона, один в качестве излучателя звука, другой — в качестве детектора. Они образуют эхолокационную установку, в которой импульсы звука излучаются и после отражения принимаются детектором (как эхо) от находящегося под водой тела. Время между моментом излучения и моментом приема импульса и определяет расстояние до тела.

Ультразвук

Ультразвуковые волны очень похожи на звуковые. Они создают в воздухе движущиеся волны давления и отличаются от звука только частотой, поскольку занимают диапазон частот свыше 20 кГц. Для ультразвуковых волн не существует верхнего предела частот — используются колебания таких частот, которые обеспечивают распространение ультразвука в данной среде.

Ультразвуковые преобразователи позволяют излучать и принимать ультразвуковые волны целого ряда частот. Они представляют собой, как правило, специальные пьезоэлектрические конструкции, имеющие резонансную частоту в диапазоне ультразвука. Подача на излучающий преобразователь колебаний от генератора на некоторой резонансной частоте вызывает излучение ультразвуковых волн. Излучатель и детектор должны подбираться для работы на одной и той же резонансной частоте.

Простое провешивание (определение расстояния) и эхолокация позволяют применять описанные преобразователи в различных областях техники и медицины. Преимуществом ультразвука является большая направленность излучения, чем у звука. В этом смысле он обладает свойствами отражения и взаимодействия, близкими к свойствам светового излучения. Лучшим примером возможностей ультразвука является ультразвуковое сканирование в медицине, в частности, для определения состояния плода в утробе матери путем внешнего обследования ее приборами.

Оптика

Свет представляет собой электромагнитное излучение.

Так же как звук, свет может быть точно описан лишь в терминах субъективного восприятия его человеком. Дело в том, что видимый свет представляет собой излучение в диапазоне длин волн, который воспринимается человеческим глазом, — от 380 до 780 нм. Безусловно, длины волн выше и ниже этих границ также обладают различными свойствами света и используются в иных областях.

Длины волн между 10 и 380 нм называются ультрафиолетовым излучением либо просто ультрафиолетовым светом. Аналогично длины волн между 780 и 3000 нм и больше называются инфракрасным излучением, хотя в обиходе это излучение называют просто инфракрасным светом.

Наиболее важной измеряемой величиной в оптике является интенсивность, хотя определяется также и цвет (для светового излучения).

Преобразователи для измерения оптических величин относят иногда к датчикам или детекторам. Для уточнения их называют еще инфракрасными, ультрафиолетовыми или световыми датчиками или детекторами. Иногда используют термины фотодатчик, фотодетектор или оптоэлектронный прибор, но они являются производными для оптических измерительных преобразователей и не дают представления о том, на какой длине волны производятся измерения.

Оптические измерительные преобразователи можно разделить на две основные категории: фотонные детекторы (термин происходит от первоначального — фотодатчик) и термодетекторы.

Фотонные детекторы

Основные принципы работы фотонных детекторов показаны на рис. 7.3. **Фотопроводящий чувствительный элемент** (рис. 7.3, а) выполняется из полупроводникового материала, у которого сопротивление изменяется пропорционально освещенности. Падающая на него световая энергия (энергия фотонов) поглощается полупроводником, производя в нем изменение числа носителей заряда и соответственно изменяя его сопротивление.

Фотодиоды (рис. 7.3, б) и фототранзисторы (рис. 7.3, в) являются примерами **фотопроводящих переходных датчиков**, где фотопроводящий полупроводник используется в переходе диода или триода. Одним из вариантов таких преобразователей служит *pin*-диод, название которого произошло от того факта, что он является переходом между полупроводниками *p*- и *n*-типов с разделяющим слоем чистого или беспримесного полупроводника (рис. 7.3, г).

Фотоизлучающие датчики излучают электроны, когда фотоны попадают на катод (в случае фотоумножителя — рис. 7.3, д) или *p—n*-переход (в случае лавинного фотодиода — рис. 7.3, е).

Фотоусилители размещаются обычно в вакуумной трубке и имеют множество диодов, управляемых постоянно возрастающим положительным потенциалом. Когда фотоны попадают в фотоумножитель и ударяются

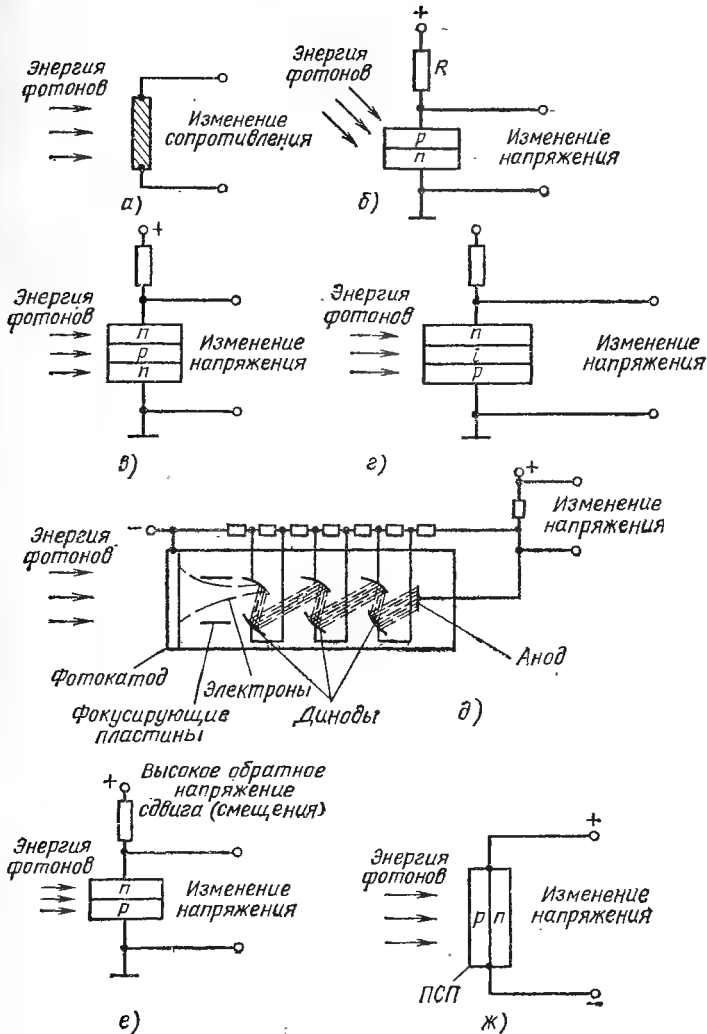


Рис. 7.3. Принцип работы преобразователей для измерения потока фотонов:

i — слой беспримесного полупроводника; ПСП — прозрачный слой полупроводника

о катод, возникающие в процессе фотоэмиссии электроны притягиваются положительно заряженным динодом. При соударении с первым динодом каждый электрон в результате вторичной эмиссии порождает два электрона или более. Таким образом обеспечивается усиление электронов в каждом диноде.

Лавинные фотодиоды реализуют подобный эффект с носителями зарядов в $p-n$ -переходе, который поддерживается при высоком обратном напряжении смещения. Падающие фотоны расщепляют дырочно-электронные носители заряда так, что электроны движутся к n -слою перехода, а дырки — к p -слою.

Высокое напряжение сдвига обеспечивает движение дырок или электронов с такой энергией, которой достаточно, чтобы и далее расщепить пару дырка — электрон и поддерживать лавинный процесс.

Фотоэлектрические датчики (рис. 7.3, ж) напоминают основные фотодиоды, в которых $p-n$ -переход используется для обнаружения падающих фотонов. Правда, переход не смещен, а когда он соединяется с нагрузочной схемой, то возникает ток, значение которого зависит от яркости падающего света. Некоторые приборы могут функционировать либо в режиме фотодиода, либо в режиме фотоэлектрического датчика.

Тепловые приемники

На практике используются три основных типа тепловых приемников: болометрические, пироэлектрические и термоэлектрические преобразователи. Все они выполняют одну и ту же функцию, что и приборы радиационной пирометрии (см. гл. 4), и поэтому подробно не рассматриваются.

ГЛАВА 8

ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Объекты измерений в области химической технологии более, чем в какой-либо другой области, не могут быть детально рассмотрены в этой книге. Объясняется подобное положение тем, что имеется очень много измеряемых величин, которые инженеры включают в число наблюдаемых в химическом производстве. Для всех них

необходимо проектировать и изготавливать соответствующие измерительные преобразователи. Ограничимся рассмотрением наиболее распространенных величин, а именно: кислотности, проводимости и окислительно-восстановительного потенциала. Для их определения требуются соответствующие преобразователи.

Химический анализ материалов представляет собой совершенно иную проблему. Невозможно в этой книге (тем более в одной главе) описать преобразователи, способные измерять уровни веществ в образце, поскольку для этого часто не существует промышленных приборов, и анализ представляет собой более сложный процесс, чем простое измерение. Иногда, правда, определенные типы приборов применяются настолько часто, что становятся типовыми. В качестве примера можно упомянуть сигнализаторы задымления, которые используются в системах противопожарной защиты помещений.

Большинство преобразователей, рассматриваемых в этой главе, предназначены для определения состава образца, отбираемого с помощью различных пробников. Внутри пробника должны обеспечиваться условия для прохождения химической реакции. Кроме того, электрические характеристики пробника, которые подлежат измерению, должны нести информацию об исходном образце. Преобразователи, удовлетворяющие описанным требованиям, называются **электрометрическими**.

Кислотность

Кислотность или щелочность раствора определяется значением водородного потенциала

$$pH = -\log_{10} [H^+],$$

где H^+ — концентрация ионов водорода в граммах на литр.

Значения pH выражаются числами от 0 до 14. У чистой воды $pH=7$, т.е. она является нейтральной — ни кислотной, ни щелочной.

Если $pH=0$, то это чисто кислотный раствор, а если $pH=14$, то чисто щелочной. Отсюда следует, что в кислоте концентрация активных ионов водорода больше, чем в щелочи.

Электрометрические измерения раствора, при которых определяется его кислотность, обычно осуществля-

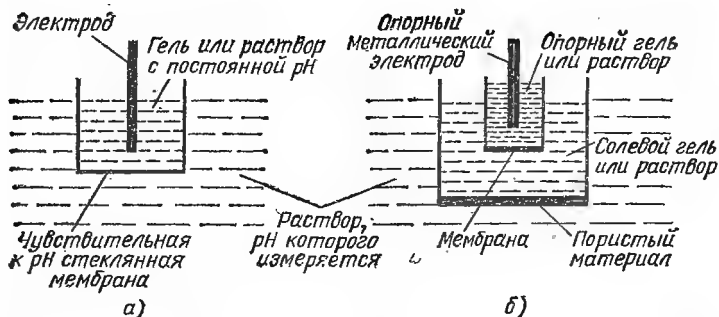
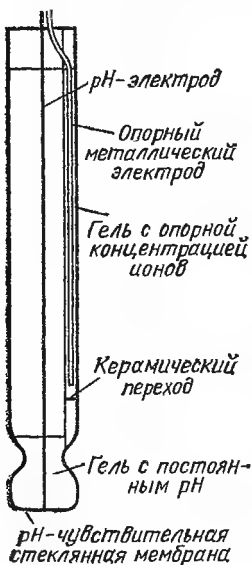


Рис. 8.1. Измерительный преобразователь для определения значения pH

ются путем помещения двух специальных электродов в раствор. Один из этих электродов называется pH-электродом (рис. 8.1, а), а другой — опорным электродом (рис. 8.1, б).



Современные pH-электроды выполняются в виде простого пробника (зонда), в котором размещаются оба электрода, называемого **комбинированным электродом** (рис. 8.2). Специальная стеклянная мембрана, чувствительная к значению pH, покрывает верх пробника так, что нет необходимости втягивать раствор в пробник.

Переносные вольтметры используются специально для измерения показания pH и непосредственного отображения его значения на шкале, хотя для этой цели можно в принципе применять любой вольтметр с достаточно высоким входным сопротивлением (по крайней мере 100 МОм). Чувствительность pH-электродов составляет 59,1 мВ на единицу значения pH при 25 °С. Необходимо внимательно относиться к компенсации изменений температуры, поскольку тепловая чувстви-

Рис. 8.2. Комбинированный pH-преобразователь, содержащий в одном зонде pH-электрод и опорный электрод

тельность преобразователя составляет около 0,2 мВ на единицу значения рН на каждый градус Цельсия. Современные рН-метры обычно содержат в своем составе температурные измерительные преобразователи либо сами непосредственно осуществляют температурную компенсацию.

Окислительно-восстановительный потенциал

Простейшая конструкция рН-электрода может быть использована для измерения окислительно-восстановительного потенциала. Положительное значение этого потенциала означает, что раствор содержит окислительное вещество, а отрицательное отражает наличие восстановительного вещества.

Преобразователи для измерения концентрации специфических ионов

Электроды для определения окислительно-восстановительного потенциала и рН-электроды являются примерами измерительных преобразователей, которые обнаруживают и позволяют измерять концентрацию специфических ионов в растворе. Однако существуют преобразователи, способные выполнять эти же функции и в отношении других типов ионов. Все они имеют одинаковую конструкцию в виде чувствительного и опорного электродов, помещенных в раствор, либо в виде двух зондов или одного зонда комбинированного типа. Вещество, из которого изготавливаются электроды, определяется, конечно, видом специфических ионов, концентрация которых измеряется.

Проводимость

Измерение проводимости растворов может помочь в определении их концентрации. Основным принципом такого измерения является электролиз, когда два электрода помещаются в раствор и между ними прикладывается некоторое напряжение. Последнее вызывает разделение компонентов раствора на ионы, которые мигрируют в направлении к электродам, формируя тем самым электрический ток. Измерение тока между электродами позволяет вычислить проводимость раствора, См:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{V}.$$

где I — ток в схеме; R — сопротивление схемы; V — напряжение на электродах.

Если два электрода имеют эффективную площадь поверхности A и расположены друг от друга на расстоянии D , то проводимость раствора определяется соотношением

$$\gamma = \frac{GD}{A}.$$

Когда два электрода располагаются в пробнике (зонде), что встречается довольно часто, отношение D/A является, конечно, постоянным и называется **постоянной электродов или постоянной ячейки**.

В ходе измерений проводимости большое значение приобретает тип используемого напряжения. Напряжение постоянного тока вызывает заметную электролитическую реакцию, приводящую к уменьшению тока между электродами. Измерение тока в этом случае даст неверные результаты о проводимости, поэтому чаще всего применяют переменное напряжение прямоугольной формы.

Электрометрический газовый анализ

Электрометрические газоаналитические преобразователи регулярно используются для определения содержания специфического газа в газовой смеси или растворе. Примером такого устройства является измерительный преобразователь выхлопных газов на основе двуокиси циркония, который применяется в системах управления автомобильными двигателями, в частности, в США. На рис. 8.3 показан принцип работы этого преобразователя.

Трубка из двуокиси циркония покрыта изнутри и снаружи пористой платиной для формирования электрических контактов. Образцовый газ с известным содержанием кислорода поступает в трубу, и каждый ее конец запирается изолирующей крышкой. Время от времени камеру с образцовым газом можно проветривать, открывая доступ в нее внешнему воздуху.

Нагревательный элемент, намотанный на трубу, нагревает ее до температуры выше 400°C . При этом ионы кислорода в двуокиси циркония приобретают подвижность, а тело трубы становится электрическим проводником. Сторона трубы, контактирующая с газом, содер-

жащим мало кислорода, становится отрицательной по отношению к ее другой стороне. В результате формируется потенциал, пропорциональный относительному содержанию кислорода в двух газах.

Измерительный преобразователь выхлопных газов автомобиля помещается непосредственно в выхлопную систему двигателя, так что внешняя сторона трубы из

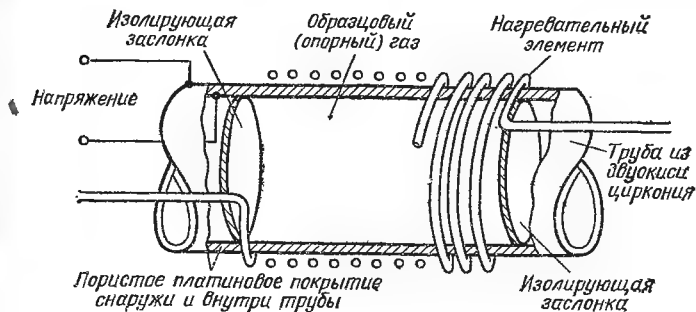


Рис. 8.3. Преобразователь выхлопных газов на основе двуокиси циркония

двуокиси циркония контактирует с выхлопными газами. Теоретически в выхлопных газах не должен содержаться кислород, поскольку он весь должен использоваться в процессе горения. Наличие кислорода, определяемое по изменению напряжения, сигнализирует о неполном сгорании газа.

Резистивный газовый анализ

Резистивный измерительный преобразователь концентрации кислорода, такой, например, как преобразователь на основе окиси титана, может служить основой анализатора выхлопных газов. Окись титана представляет собой вещество, сопротивление которого изменяется в зависимости от числа молекул кислорода, абсорбированных на его поверхности.

Преобразователь изготавливается из платиновой проволоки или тонкопленочного резистора, поверхность которого покрывается окисью титана. В зависимости от содержания кислорода в выхлопном газе слой окиси титана изменяет свое сопротивление и, следовательно, общее сопротивление прибора.

Для определения содержания иных газов применяются другие вещества. Существуют также преобразователи для обнаружения пропана и метана. В резистивных преобразователях имеются два элемента: один покрытый веществом, а другой — непокрытый. Он используется как температурный компенсирующий элемент, когда измерения осуществляются с преобразователем, включенным в мостовую схему.

ГЛАВА 9

СОПРЯЖЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРОЙ

Схема соединения преобразователей имеет важнейшее значение не только потому, что имеется большое число их различных типов. К счастью, используемые для этого схемы одинаковы для приборов различного типа и поэтому их легко обобщить. Вместе с тем инженер должен осознавать различия между преобразователями, чтобы аккуратно адаптировать схему сопряжения для конкретного устройства. При создании измерительных систем приходится решать также проблемы шумов и взаимного влияния преобразователей и других блоков систем друг на друга.

Большинство принципов обеспечения совместимости измерительных преобразователей можно понять, рассмотрев в качестве примера резистивные преобразователи. У них изменяется сопротивление при варьировании измеряемой величины. Обычно интерфейсная схема применяется для того, чтобы привести изменение сопротивления к изменению напряжения. Это напряжение затем формирует входной сигнал для другой части измерительной системы.

Известно множество способов преобразования изменения сопротивления в изменение напряжения. Простейшей схемой для этого является делитель напряжения (рис. 9.1, а), в котором сопротивление преобразователя R_i включается последовательно с другим сопротивлением R_t и напряжением возбуждения V_{exc} . Выходное напряжение V_{out} изменяется при варьировании сопротивления преобразователя в соответствии с известной формулой делителя напряжения

$$V_{out} = V_{exc} \frac{R_i}{R_i + R_t}.$$

Когда изменяющееся сопротивление преобразователя вызывает изменение нагрузки источника возбуждающего напряжения, для обеспечения возбуждения предпочтительнее использовать источник постоянного тока.

Действительно, если применяется источник постоянного тока, то в схему не нужно включать последовательного сопротивления — напряжение, генерируемое на сопротивлении преобразователя, можно измерить непосредственно (рис. 9.1, б).

Конечно, наиболее распространенным способом соединения резистивных преобразователей с измерительной системой является применение несбалансированного мо-

Рис. 9.1. Различные способы сопряжения резистивного преобразователя на основе превращения изменения сопротивления в изменение напряжения

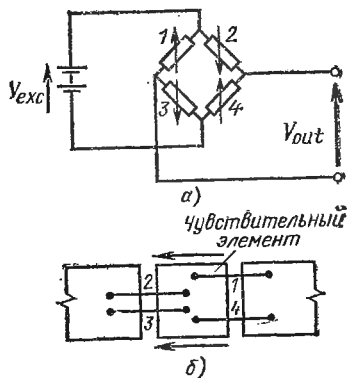
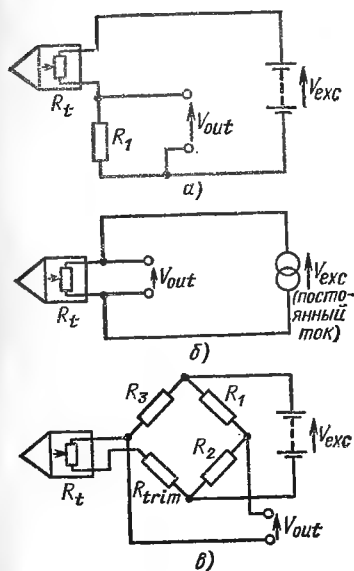


Рис. 9.2. Мостовая схема сопряжения тензометров и структуры преобразователя

ста (рис. 9.2, в), при котором сопротивление прибора образует одно из плеч моста Уитстона. Если преобразователь имеет больше одного чувствительного элемента, то в идеальном случае их следует также соединить в мостовую схему. Обычно последовательно с преобразователем включается подстроечный резистор R_{trim} , чтобы мост можно было сбалансировать в любой точке (скажем, в точке наименьшего сопротивления) диапазона изменения измеряемой величины.

Выходное напряжение схемы

$$V_{out} = V_{exc} \left(\frac{R_3}{R_3 + R_t + R_{trim}} - \frac{R_t}{R_1 + R_3} \right).$$

На практике такая схема называется **тензометрическим мостом**, поскольку она часто используется вместе с тензометрическими преобразователями. Как правило, в мостовую схему включаются один, два или даже четыре чувствительных элемента одного и того же преобразователя. На рис. 9.2, а показаны четыре тензометрических элемента, объединенных в мостовую схему. Направленные вверх стрелки обозначают увеличение сопротивления резисторов, а направленные вниз — его уменьшение.

На рис. 9.2, б приведена возможная механическая конструкция элементов, в которой линии чувствительности смещаются влево или вправо в зависимости от того, какое напряжение прикладывается к прибору. Обозначенные на рис. 9.2, а направления изменения сопротивления соответствуют движению изображенного на рис. 9.2, б чувствительного элемента влево при приложении напряжения.

Температурная компенсация тензометров

При использовании тензометров для измерения напряжения на поверхности, которая имеет разную температуру, возникает проблема учета разностного расширения. Если, скажем, температура возрастает, то на измеряемой поверхности появляются температурные расширения, отличающиеся от тех, которые возникают при нормальных условиях работы тензометра. Но, поскольку чувствительный элемент фиксирован на поверхности, прибор подвергается воздействию, обусловленному ее расширением, и у него изменяется сопротивление.

Чтобы устранить эту погрешность измерений, некоторые тензометры конструируются так, что изменения сопротивления вследствие дифференциального расширения балансируются за счет температурного изменения сопротивления резисторов (противоположный эффект). Это может быть достигнуто только за счет применения соответствующих материалов в процессе изготовления тензометров. Такая компенсация обычно предусматривается в приборах, спроектированных для работы на поверхностях одного из следующих материалов: нержавеющей стали, низкоуглеродистой стали и алюминия.

Температурная компенсация с помощью мостовых схем

Рассмотренная ранее погрешность измерений и соответствующая ей схема компенсации характерна для тензометров. Одной из проблем, связанных с температурой, при использовании любого измерительного преобразователя, включенного по основной мостовой схеме,

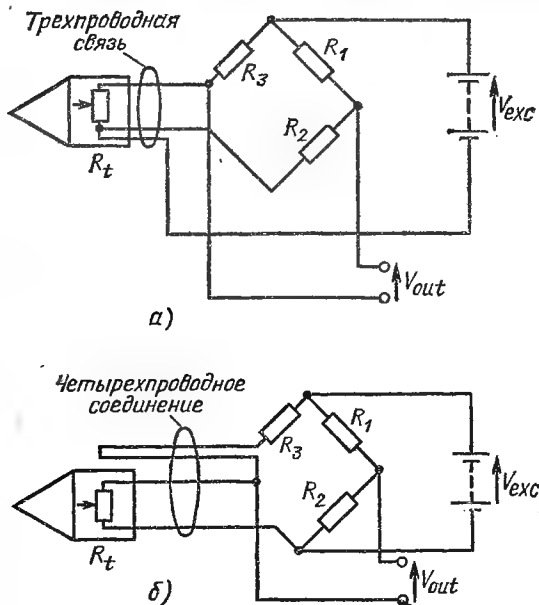


Рис. 9.3. Способы компенсации температурных изменений в тензометрической мостовой схеме

является учет длины проводников, соединяющих его с мостовой схемой. Сопротивление любого материала, включая и соединительные провода, зависит от температуры. Поэтому в зависимости от окружающей температуры может варьироваться выходное напряжение моста.

К счастью, компенсация такого рода температурных погрешностей чрезвычайно проста. На рис. 9.3, а показан один из возможных способов компенсации, в котором применяется **трехпроводное подсоединение** преобразо-

вателя к мостовой схеме. Три соединительных провода имеют одну и ту же длину и, следовательно, одно и то же сопротивление. Таким образом, любое изменение сопротивления плеча преобразователя в мостовой схеме компенсируется аналогичным изменением сопротивления другого плеча R_2 .

Второй способ температурной компенсации представлен на рис. 9.3, б. Здесь компенсационное плечо моста выполнено в виде проволочного контура, подсоединенного параллельно преобразователю. Изменение сопротивления вследствие температурных вариаций действует одинаково на оба плеча мостовой схемы.

В обоих рассмотренных методах температурной компенсации соединительные провода должны быть свиты в один жгут, чтобы обеспечивать одинаковое воздействие на них температурных вариаций по всей длине.

Установка тензометров

Тензометры отличаются от большинства других преобразователей способом их установки на поверхности, напряжение на которой следует измерить. Как правило, они закрепляются «намертво» на этой поверхности. Для этого обычно используется эпоксидный клей, с помощью которого крепится элемент или прибор в нужном месте. Приклеивать преобразователь нужно очень аккуратно, так как после установки его невозможно ни переместить, ни отсоединить.

При установке тензометров рекомендуется соблюдать следующую последовательность операций:

1) непосредственно перед установкой преобразователя поверхность очищается и обрабатывается шкуркой;

2) выбирается клей. Считается, что клей пригоден для использования с данной поверхностью и данным тензометром, если на него не влияют никакие внешние факторы — влажность, температура и т. п.

3) после аккуратного приклеивания (в соответствии с инструкцией изготовителя) тензометр фиксируется на поверхности с помощью металлической пластинки с лентой из наклеивающегося пластика или другого материала, располагаемой между пластинкой и тензометром. Затем для затвердевания клея прикладывается определенное давление к этой пластине в течение времени, указанного в рекомендациях изготовителя;

4) после высыхания клея удаляют фиксирующее устройство и наносят на тензометр соответствующий влаго- непроницаемый слой;

5) соединять отдельные элементы тензометрической установки лучше всего с помощью соответствующего соединительного блока, устанавливаемого с помощью болтов или клея вблизи преобразователя на измеряемой поверхности. Влагонепроницаемый слой необходимо наносить также и на соединительный блок.

Шумы

Кроме упомянутых ранее проблем температурного влияния и длинных соединительных линий у измерительных преобразователей существует и еще одна важная проблема. Речь идет о воздействии шумов, которые могут влиять на характеристики систем с такими устройствами.

В любой системе с чувствительными элементами к входу системы прикладывается слабый сигнал, поэтому даже незначительный шум будет усиливаться до такой степени, что станет невозможно проводить точные измерения.

Проблема шумов может возникать по самым различным причинам. В некоторых случаях шумы принимаются в расчет при создании системы. Их уровень уменьшается до приемлемого путем фильтрации, но во многих отношениях это аналогично запираению входной двери после того, как в дом ударила молния. Чтобы гарантировать хорошие характеристики системы, следует учитывать всевозможные шумы и проектировать систему так, чтобы уменьшить их до такого уровня, при котором с ними можно не считаться в первом приближении.

Взаимные помехи

Известны различные типы шумов, действующих в измерительной системе. Шумы, которые наводятся первоначально при подсоединении проводов между преобразователем и схемой сопряжения (но встречающиеся также и в других местах системы), обычно называются **взаимными помехами**. Они фактически создаются человеком. Примером взаимных помех являются низкочастотный фон переменного тока, генерируемый усилителем

и громкоговорителем домашнего радиоприемника. Низкочастотный фон на частотах 50 и 100 Гц генерируется первоначально усилителем, поскольку около него находится источник питания.

Источник питания в основном производит низкочастотные шумы частотой 50 и (или) 100 Гц (если в источнике имеется двухполупериодное выпрямление перемен-

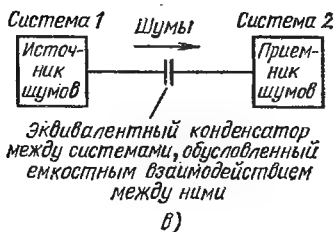
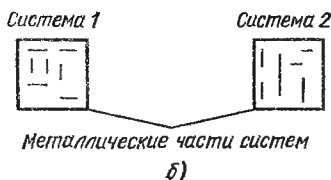
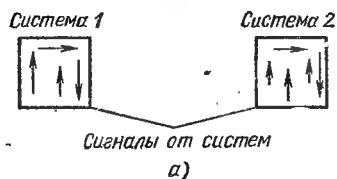


Рис. 9.4. Пример емкостного взаимодействия систем

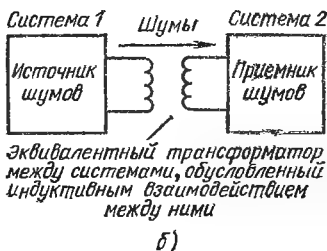
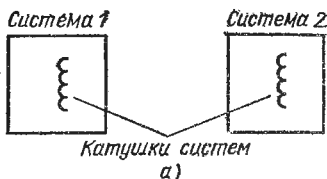


Рис. 9.5. Пример индуктивного взаимодействия систем

ного тока), и они наводятся в усилителе. Проблема становится первоочередной, поскольку, сигнал малой амплитуды, генерируемый звукоснимателем магнитофона (или в случае измерительной системы генерируемый первичным измерительным преобразователем), должен быть усилен, чтобы динамик производил звук необходимой громкости. Наводки такого рода возникают между преобразователем и усилителем, а взаимные помехи усиливаются с полезным сигналом.

Два главных типа взаимных помех, наиболее часто встречающихся на практике, показаны на рис. 9.4 и 9.5.

Взаимные помехи, обусловленные емкостной связью, возникают в том случае, если две системы разделены между собой. Сигналы, имеющиеся в каждой системе (рис. 9.4, а) и в идеальном случае не взаимодействующие друг с другом, оказываются между ними. Конечно, металлические части (проводники, кожухи и др.) каждой системы, сообщаящиеся друг с другом через воздух, образуют конденсатор (рис. 9.4, б). Из эквивалентной схемы такой аппаратуры (рис. 9.4, в) очевидно, что этот конденсатор работает как конденсатор связи, а сигнал от первой системы может проходить ко второй в форме взаимных помех.

На рис. 9.5 показано аналогичное устройство, в котором две системы, имеющие в своем составе индуктивные компоненты, могут взаимодействовать по принципу трансформатора связи. Подобное явление известно под названием взаимных помех, обусловленных магнитной или индуктивной связью.

В каждой категории взаимных помех существуют различные типы помех, а их название определяется характером эффектов, который они производят. Одним из типов емкостных взаимных помех является **емкостный низкочастотный фон**, возникающий, как это было описано ранее, когда источник питания находится вблизи усилителя и между ними образуется емкостная связь.

К другому типу помех относятся **емкостные перекрестные помехи**, которые появляются, когда сигналы одной части системы по емкостным связям поступают в ее другие части и взаимодействуют между собой. **Индуктивный низкочастотный фон** или **индуктивные перекрестные искажения** являются магнитосвязанным эквивалентом ранее описанных шумов. Любой или даже все указанные типы взаимных помех генерируются такими потенциально возможными их источниками, как блоки питания, электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания и др.

Один из первых способов подавления или устранения взаимных помех состоит в соединении преобразователя и схемы сопряжения экранированным или коаксиальным кабелем. Заземление экранирующей оплетки осуществляется в предположении, что она образует экран между потенциальным источником шумов и системой. Конечно, это предположение не всегда выполняется на практике, и тогда использование заземленных коакси-

альных соединительных линий не уменьшает, а увеличивает взаимные помехи. Смысл рассматриваемого предположения заключается в том, что экран служит по существу электростатическим «разделителем». Его эквивалентная схема показана на рис. 9.6.

С введением экрана вместо одной емкостной связи потенциального источника шумов со схемой сопряжения (потенциальным приемником помех) образуются два конденсатора. Если электростатический экран имеет нулевое сопротивление относительно земли, то эквивалент-

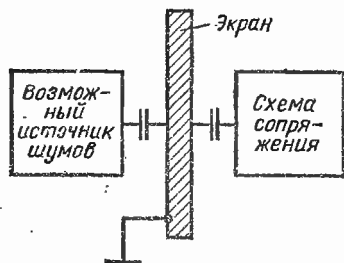


Рис. 9.6. Эквивалентная схема электростатического экрана для случая применения экранированного соединительного кабеля между измерительным преобразователем

ная схема представляет собой связанный непосредственно с землей через емкостную связь источник шумового сигнала. В этом случае не возникает взаимных помех. Если же экран обладает конечным сопротивлением относительно земли (это справедливо всегда при использовании длинных линий связи между преобразователем и остальной частью системы — исключительно потому, что кабель имеет сопротивление), то источник помех будет генерировать напряжение шумов между экраном и землей. Правда, как только возникают взаимные помехи, ситуация может стать хуже, чем до установки экрана. Конечно, при наличии коаксиального экранированного кабеля малой длины подобная проблема не возникает.

С другой стороны, взаимные помехи возникают и в случае применения экранированного соединительного кабеля, если неверно понята сущность заземления. На рис. 9.7, а показан преобразователь, соединенный с усилителем коаксиальным кабелем. Заземление экрана кабеля выполнено в двух точках — у источника и приемника. Такое заземление, конечно, не гарантирует, что напряжение в двух различных точках земли будет оди-

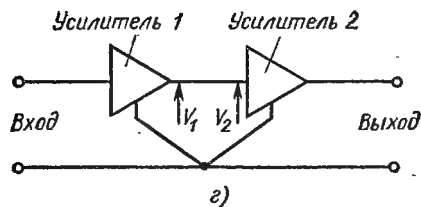
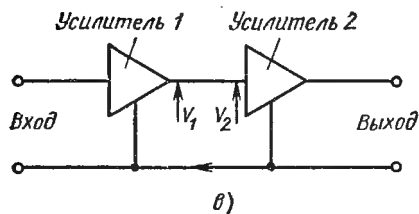
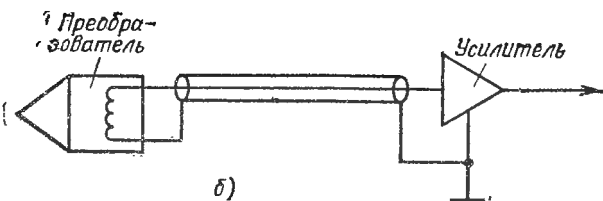
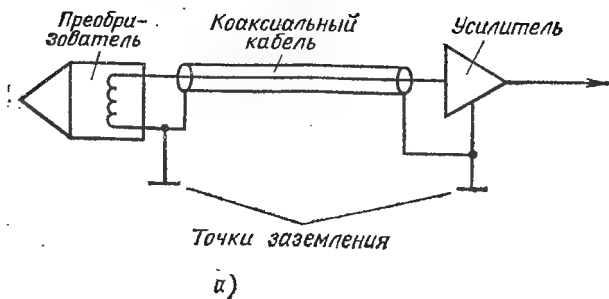


Рис. 9.7. Различные способы заземления

наковым. Если существует даже небольшая разность потенциалов между точками заземления, то по экрану будет протекать ток, вызывая взаимные помехи. Подобная схема называется **контуром заземления**. Короче говоря, когда экранированный коаксиальный кабель используется для соединения источника сигнала и приемника, экран должен быть заземлен только на одном конце (рис. 9.7, б).

Контур заземления может возникать также и внутри одиночной схемы. Если, например, два усилителя, расположенных рядом друг с другом, соединены последовательно и каждый имеет свою точку заземления (рис. 9.7, в), то эти точки могут находиться под разным потен-

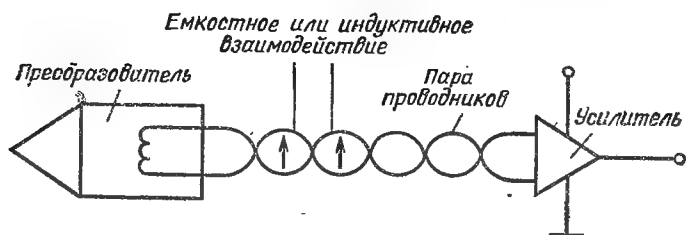


Рис. 9.8. Сбалансированное соединение преобразователя и усилителя с использованием пары скрученных проводников для устранения эффекта взаимных помех

циалом. В этом случае выходное напряжение первого усилителя V_1 будет отличаться от входного напряжения второго усилителя, вследствие чего появится шумовой ток. Такая же ситуация возникает даже в том случае, когда две точки заземления образуются одним и тем же проводником, который может представлять собой отдельный отрезок проводящей дорожки печатной платы. По существу имеется только один надежный способ обеспечения качественного заземления чувствительных схем. Он заключается в создании одной точки заземления для всех частей схемы, как это показано на рис. 9.7, г.

Еще один способ соединения источника сигнала и приемника, состоящий в использовании скрученной пары проводов, известен под названием **равновесного соединения** (рис. 9.8). Взаимные помехи действуют на каж-

дый проводник этой скрученной пары, однако в силу скручивания проводов они в каждой точке направлены встречно друг к другу, а общий эффект от их действия равен нулю.

Защитные кольца

Емкостные и индуктивные перекрестные искажения, так же как и простые резистивные перекрестные искажения, могут возникать, если в схеме сопряжения используется усилитель с большим входным сопротивле-

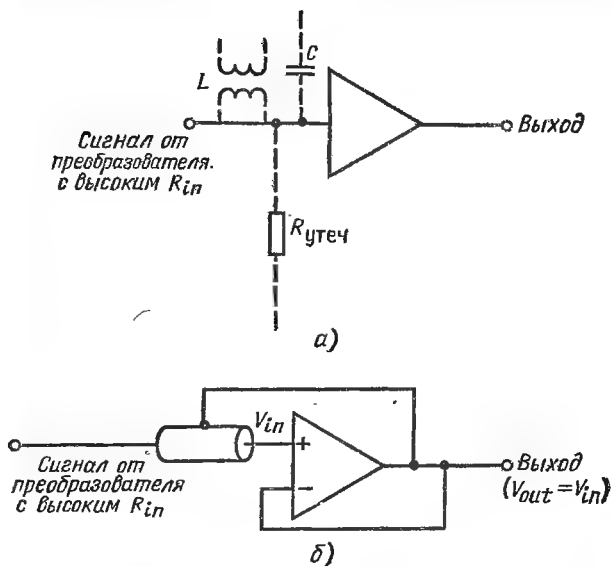


Рис. 9.9. Применение защитного кольца для сокращения взаимных помех

нием. Такой усилитель необходим для соединения измерительной системы и преобразователя с аналогичным выходным сопротивлением. Высокое входное сопротивление преобразователя говорит о том, что любая паразитная емкость C , индуктивность L или сопротивление утечки $R_{утеч}$ на входе схемы будет приводить к появлению нежелательных сигналов в усилителе (рис. 9.9, а).

Современные операционные усилители обычно склон-

ны к этому, когда они выполняются в соответствии со схемой на рис. 9.9, а. Их входные токи смещения всего лишь в несколько пикоампер вызывают значительные взаимные помехи. Одним из способов решения этой проблемы является использование защитного кольца (рис. 9.9, б). При этом высокоомный вход усилителя заключается в низкоомную защиту, находящуюся под тем же потенциалом, что и сам вход.

Обычно высокоомный усилитель выполняется в виде неинвертирующего усилителя (буфера). Поэтому его выходной сигнал в точности равен входному, а выходное сопротивление оказывается намного меньше входного. Защитное кольцо соединяется напрямую с выходом усилителя и формирует низкоомный вход сигналам от любого паразитного конденсатора, индуктивности или сопротивления утечки. В печатных платах защитное кольцо образуется путем создания больших секций медных дорожек, полностью окружающих усилитель, с единым жгутом проводников, обеспечивающих подачу напряжений питания в другие соединения.

Случайные шумы

Другой тип шумов известен под названием случайных или фундаментальных шумов. Эти шумы, возникающие в самой системе, обусловлены основными физическими свойствами ее компонентов. Взаимные помехи всегда имеют особые виды или формы, а случайные характеризуются непредсказуемостью, поэтому их трудно устранить. Однако еще на стадии проектирования системы удастся обеспечить достаточно низкий уровень этих шумов.

Все шумы в системе принято характеризовать с помощью отношения полезного сигнала и нежелательных шумов, т. е. отношения сигнал/шум

$$\left(\frac{\text{мощность сигнала}}{\text{мощность шума}} \right).$$

Мощность этих двух сигналов вычисляется с учетом средних квадратических значений напряжения сигнала и шума, деленных на выходное сопротивление схемы. Таким образом, отношение сигнал/шум

$$\frac{\bar{V}_s^2/R}{\bar{V}_n^2/R} = \frac{\bar{V}_s^2}{\bar{V}_n^2}.$$

где черта над квадратом напряжения обозначает его среднее значение.

Поскольку отношение сигнал/шум есть отношение мощностей, оно в общем случае выражается в децибелах (дБ). Поэтому можно записать

$$\frac{\text{сигнал}}{\text{шум}} = 10 \log_{10} \frac{S}{A} = 10 \log_{10} \frac{V_s^2}{\bar{V}_n^2}.$$

Допустимое значение отношения сигнал/шум зависит от характеристик и назначения системы. Для радиоприемных систем оно должно быть равно по меньшей мере примерно 70 дБ, чтобы фоновые шумы не были слышны при прослушивании музыки. Для телефона это условие не столь существенно, поэтому допустимое значение отношения сигнал/шум в этом случае составляет около 40 дБ. Хорошее телевизионное изображение возможно при отношении сигнал/шум в антенне порядка 50 дБ.

Коэффициент шума

Когда система состоит из множества отдельных частей (преобразователя, соединительного кабеля, схемы сопряжения и т. д.) и каждая часть имеет свое собственное отношение сигнал/шум, возникает вопрос о способе вычисления общего для системы в целом отношения сигнал/шум. Это можно сделать, если охарактеризовать каждую составную часть системы коэффициентом шума, который называется показателем шума. Он определяется следующим образом:

$$F = \frac{\text{отношение сигнал/шум на входе}}{\text{отношение сигнал/шум на выходе}}.$$

Поскольку коэффициент шума по аналогии с отношением сигнал/шум представляет собой отношение мощностей, он в общем случае также выражается в децибелах (дБ), т. е.

$$F = 10 \log_{10} \frac{\text{отношение сигнал/шум на входе}}{\text{отношение сигнал/шум на выходе}}.$$

Конечно, когда отношение сигнал/шум на входе и выходе приводятся в децибелах, коэффициент шума (в децибелах) можно вычислить в виде

$$F = \text{отношение сигнал/шум на входе} - \text{отношение сигнал/шум на выходе}.$$

Например, схема с отношением сигнал/шум на входе 70 дБ и отношением сигнал/шум на выходе 65 дБ имеет коэффициент шума 5 дБ. Чем меньше коэффициент шума, тем лучше шумовые характеристики системы (схемы).

Когда известны коэффициенты шума каждой составной части системы в отдельности, можно вычислить общее для нее отношение сигнал/шум путем первоначального вычисления общего коэффициента шума. Скажем, в системе, изображенной на рис. 9.10, выходной сигнал преобразователя сначала усиливается, а затем отобража-

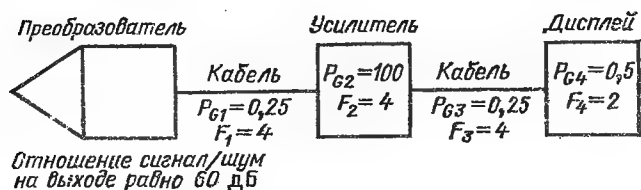


Рис. 9.10. Учет коэффициентов шумов каждой составной части системы для вычисления общего отношения сигнал/шум

ется на приборе с подвижной катушкой или на простом индикаторе. Контроль за измеряемой величиной осуществляется за счет считывания показателей отображающего прибора.

Теперь рассмотрим простой пример. Преобразователь имеет отношение сигнал/шум на выходе 60 дБ. Между ним и усилителем, а между усилителем и отображающим прибором имеются соединительные провода с коэффициентом усиления по мощности (P_{G1} и P_{G3}) 0,25. Они являются резистивными и пассивными, поэтому не дают усиления, а только ослабляют сигнал. В таких частях системы коэффициенты шума (F_1 и F_2) просто обратно пропорциональны коэффициентам усиления, в частности, в соединительных проводах коэффициент шума равен 4. Отображающий прибор, как и провода, также является пассивным, его коэффициент усиления $P_{G4} = 0,5$, а следовательно, коэффициент шума составляет 2. У усилителя коэффициент усиления по мощности $P_{G2} = 100$. Это активная часть системы. Собственный коэффициент шума усилителя составляет, скажем, 4.

Общий коэффициент шума определяется из соотношения

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{P_{G1}} + \frac{F_1 - 1}{P_{G1} P_{G2}} + \frac{F_4 - 1}{P_{G1} P_{G2} P_{G3}}.$$

Подобные вычисления легко выполнить для любого числа составных частей системы. Необходимо только, чтобы для них были известны коэффициенты усиления по мощности и коэффициенты шума.

В нашем примере указанное соотношение дает следующее значение коэффициента шума:

$$F = 4 + \frac{4 - 1}{0,25} + \frac{4 - 1}{100} + \frac{2 - 1}{25} = 16,07 \text{ (примерно 12 дБ)}.$$

Общее отношение сигнал/шум поэтому вычисляется как разность между отношением сигнал/шум преобразователя и коэффициентом шума схемы сопряжения, т. е. $60 - 12 = 48$ дБ. Это значение может быть удовлетворительным или неприемлемым в зависимости от типа системы.

На рис. 9.11 показано, как инженер может спроектировать систему, чтобы уменьшить воздействие шумов. Здесь те же составные части, что и в ранее рассмотрен-

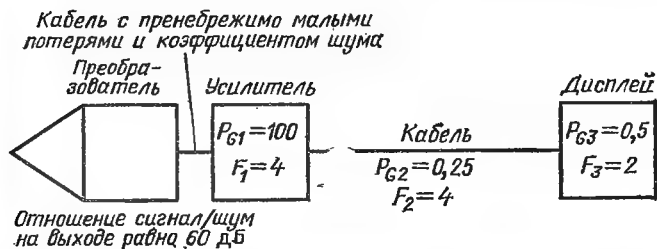


Рис. 9.11. Улучшение общего отношения сигнал/шум за счет размещения усилителя вблизи преобразователя

ной системе, однако между преобразователем и усилителем используется небольшой соединительный кабель — настолько короткий, что можно пренебречь потерями мощности в нем и собственным коэффициентом шума. Это соответствует случаю, когда преобразователь вместе с интегральной схемой сопряжения применяется для наблюдения за измеряемой величиной.

С помощью того же самого соотношения, что и для ранее рассмотренной системы, получаем новое значение коэффициента шума:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{P_{G1}} + \frac{F_3 - 1}{P_{G1} P_{G2}} =$$

$$= 4 + \frac{3}{100} + \frac{1}{25} = 4,07 \text{ (примерно 6 дБ)}.$$

Таким образом, общее отношение сигнал/шум системы в этом случае улучшилось примерно на 6 дБ.

Полученный результат свидетельствует о том, как важно разместить преобразователь в непосредственной близости от первого каскада усиления в схеме сопряжения. Длинные соединительные провода вызывают шумы, которые дают низкое отношение сигнал/шум. Кроме того, приведенные примеры показывают, что коэффициент шума системы почти полностью зависит от коэффициента шума первого усилителя (поскольку коэффициенты шума других частей играют относительно малую роль в вычислениях общего коэффициента шума системы).

С этой точки зрения становится понятным использование малозумящих предусилителей в первых каскадах схем сопряжения измерительных систем. Там, где это возможно, малозумящие предусилители следует размещать вместе с преобразователями в одном корпусе.

В приведенных рассуждениях вводились некоторые упрощения при рассмотрении коэффициента шума. Действительное значение коэффициента шума зависит от существенно большего числа факторов, например температуры, диапазона частот и выходного сопротивления предыдущего каскада.

Аналоговые и цифровые системы преобразования

На определенной стадии анализа измерительных систем инженер должен рассматривать и цифровые преобразования. Поскольку все преобразователи по существу являются аналоговыми, это означает, что необходимы переходы от аналоговых сигналов к цифровым. Существуют разные способы осуществления такого перехода, они будут рассмотрены ниже.

Важным моментом в операциях цифрового преобразования является то, что любой цифровой сигнал содержит дискретные значения или фиксированный шаг в не-

котором диапазоне значений или шагов. С другой стороны, аналоговый сигнал принимает любое значение в этом же диапазоне. Поэтому, чтобы обеспечить точное преобразование аналогового сигнала в цифровой, инженер должен выбрать достаточно большое число цифр в диапазоне изменения физической величины.

Дискретные значения в диапазоне изменения цифровой величины называются уровнями квантизации и полностью зависят от числа двоичных разрядов в цифровом слове, используемом для представления значения некоторой величины. Например, если речь идет о 4-разрядном слове для цифрового представления значения, то для этого имеется только $2^4 - 1 = 15$ уровней квантизации. В общем случае n -разрядное слово дает всего 2^n уровней в ходе аналого-цифрового преобразования.

Это означает, что разрешающая способность цифровой системы ограничивается главным образом уровнями квантизации, поскольку отдельное цифровое слово может представлять лишь одно отдельное аналоговое значение. Расширение числа разрядов в слове, используемом в цифровой системе, увеличивает разрешающую способность системы. Однако не следует забывать, что и здесь существуют определенные ограничения.

Что касается самого преобразования, то здесь рассматривается преобразование аналогового сигнала измерительного устройства в цифровой код, приемлемый, скажем, для микропроцессорной системы. Такие преобразования называются аналого-цифровыми. Большинство аналого-цифровых преобразований базируется на принципе грубого превращения аналогового сигнала в цифровой с последующим преобразованием его вновь в аналоговый (цифро-аналоговое преобразование само по себе является простым) и сравнением полученного значения с первоначальным. Если первоначальное значение больше, чем полученный в ходе двойного преобразования аналоговый сигнал, то цифровое значение увеличивается, если меньше — то уменьшается до тех пор, пока оба значения не сравняются.

Одним из наиболее эффективных и распространенных устройств является аналого-цифровой преобразователь, основанный на принципе последовательного приближения. Его структурная схема показана на рис. 9.12, а. Сигнал от компаратора прикладывается к регистру с управляющей логикой. В выключенном состоянии

регистр устанавливается в 0, и поэтому на выходе цифро-аналогового прибора отсутствует напряжение. В этом случае любое аналоговое напряжение на входе компаратора вызывает на его выходе логическую 1.

Вначале тактовые импульсы воздействуют на блок управляющей логики и вызывают изменение младшего

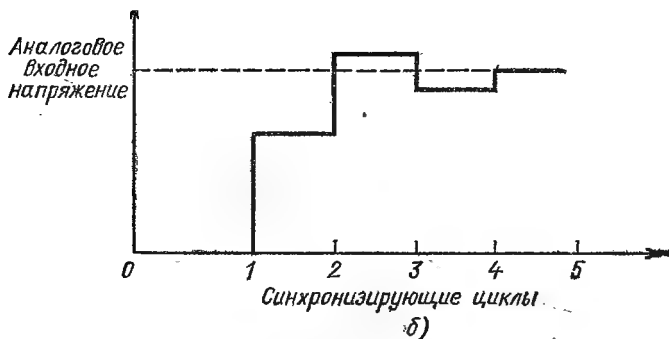
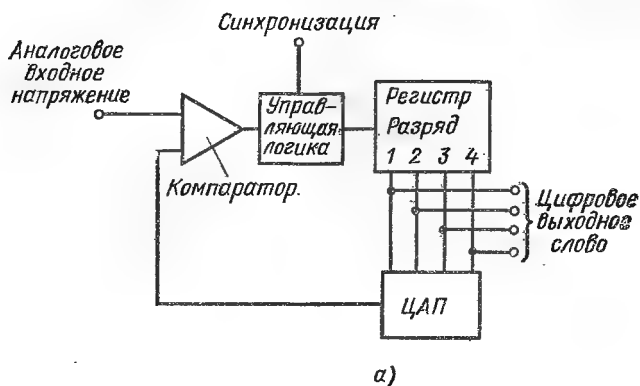


Рис. 9.12. Аналого-цифровой преобразователь последовательного приближения

разряда регистра на 1, вследствие чего сигнал на выходе цифро-аналогового преобразователя увеличивается. Если аналоговое входное напряжение все еще выше напряжения на выходе устройства, то выход компаратора остается в состоянии логической 1. Тогда очередной тактовый импульс блока управления изменяет на 1 следующий разряд регистра и таким образом происходит изменение каждого его разряда.

Когда аналоговое входное напряжение после какого-либо шага аппроксимации станет меньше, чем выходное напряжение цифро-аналогового преобразователя, управляющий блок устанавливает последний разряд в 0 прежде, чем произойдет изменение следующего разряда на 1. Выходное напряжение устройства в форме времен-

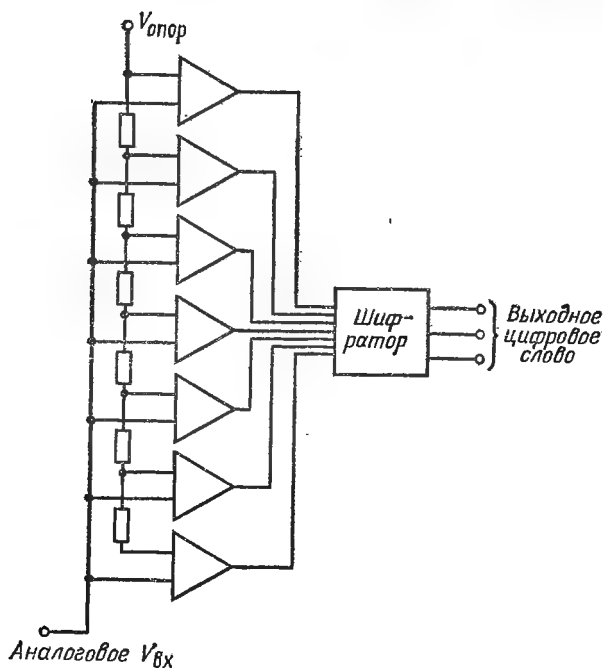


Рис. 9.13. Параллельный преобразователь аналоговых сигналов в цифровые

ной диаграммы показано на рис. 9.12, б для четырехразрядного преобразователя последовательного приближения, изображенного на рис. 9.12, а. Продолжительность преобразования любого входного аналогового сигнала в n -разрядном преобразователе равна длительности n периодов тактовых импульсов.

Одним из наиболее распространенных аналого-цифровых преобразователей является так называемый параллельный (вспышковый) преобразователь (рис. 9.13).

Современные приборы этого типа легко изготавливаются в форме интегральных схем и имеют высокую скорость преобразования. В параллельном преобразователе используются несколько отдельных элементарных компараторов, которые сопоставляют аналоговый сигнал с некоторым числом опорных напряжений.

Каждое опорное напряжение соответствует уровню квантования, поэтому для 3-разрядного цифрового выхода (как это показано на рис. 9.13) должно применяться семь опорных напряжений (т.е. $2^3 - 1$) и, следовательно, семь компараторов. Опорные напряжения образуются с помощью цепочки резисторов, подключенных к источнику общего опорного напряжения. Точность преобразования определяется исключительно точностью опорных напряжений.

Само по себе преобразование выполняется очень просто и быстро. Шифратор в параллельном преобразователе использует выходы компараторов для превращения их непосредственно в цифровой двоичный выходной сигнал.

ПОСЛЕСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА

Современная концепция метрологического обеспечения производства предусматривает существенное расширение масштабов использования средств измерений и контроля в процессе изготовления изделий. Высокая степень автоматизации, возросшие требования к качеству привели к тому, что контрольно-измерительные операции, которые ранее рассматривались как необходимые, но вспомогательные работы, стали сегодня одними из основных. Они составляют более 40 % от трудоемкости работ по изготовлению изделий. Для оправдания столь больших затрат на измерения и контроль необходимо достижение высокой эффективности (высокого уровня) метрологического обеспечения производства, т. е. достижения значительных приращений в производительности, качестве и других показателях производства за счет совершенствования методов и средств измерений и контроля.

С этой целью в современной концепции метрологического обеспечения иначе формулируется назначение измерений и контроля: если ранее они служили для обнаружения дефектных изделий, то сейчас они используются для предупреждения брака. Чтобы выполнить это предназначение, предусматривается измерять и контролировать параметры вероятных источников возникновения брака — технологического оборудования, оснастки, инструмента, энергоносителей, технологических сред и т. п. Поэтому в современном производстве применяется большое количество средств измерений, выполненных часто в форме первичных измерительных преобразователей или датчиков, встроенных в технологические линии.

Особенно большое значение приобретают датчики в гибких автоматизированных производствах, где они определяют в значительной мере и производительность труда, и уровень брака, и точность изготовления изделий.

В механообработке линейно-угловые размеры деталей, выполняемых по 7—8 и более грубым качествам, могут быть обеспечены технологическими методами и средствами. Средства измерений используются при этом только в целях отладки производственного процесса и выборочного контроля при периодических проверках его точности. Более высокая точность изготовления достигается не только за счет прецизионного технологического оборудования, но и путем его периодической или непрерывной подналадки по результатам измерений и контроля, для чего используются многочисленные встроенные датчики.

Тем не менее масштабы использования датчиков в производственном процессе признаются недостаточными. К тому же при выборе датчиков, необходимых для автоматизации технологического процесса, часто допускаются ошибки, поскольку конструкторам и технологам недостает знаний о современных средствах измерений и контроля производственного назначения. По причине недостаточной надежности используемых датчиков, нехватки их в важнейших точках технологических линий последние используются лишь на 70 % от своей потенциально возможной производительности.

Для обеспечения наблюдаемости технических и технологических объектов, находящихся в эксплуатации, также требуется большое число датчиков в их составе. Встроенные датчики существенно улучшают характеристики автомобилей, бытового оборудования, уменьшают возможность возникновения аварий на крупных промышленных предприятиях. Иначе говоря, сфера применения датчиков постоянно и быстро расширяется. Возрастают и объемы их производства: годовое производство датчиков во всем мире достигает 5—6 млрд. долларов, а ежегодный прирост объемов продаж составляет 15 % и более.

Таким образом, знания о датчиках необходимы сегодня широкому кругу инженерно-технических работников, связанных с созданием, испытаниями и эксплуатацией управляющих и контрольно-измерительных систем различного назначения. Однако в отечественной литературе ощущается явный дефицит книг и пособий по принципам их построения и особенностям применения. Представляется, что в определенной степени этот пробел может заполнить предлагаемая читателям переводная

книга, содержащая начальные сведения о датчиках, принципах их построения, характеристиках и способах применения в различных системах. Написанная простым языком, излагающая необходимый минимум знаний о датчиках, акцентирующая внимание на прикладных вопросах она доступна конструкторам, технологам, эксплуатационщикам и даже конструкторам-любителям.

Е. И. СЫЧЁВ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Allocca J. A. Electronic Instrumentation. Reston, 1983.
Allocca J. A. Transducers, Theory and Application. Reston, 1983.
Bannister B. R., Whitehead D. G. Transducers and Interfacing. Van Nostrand Reinhold, 1986.
Brindley K. Modern Electronic Engineer's Pocket Book. Heinemann, 1985.
Cluley J. C. Transducers for Microprocessor Systems. Macmillan, 1985.
Norton H. N. Sensor and Analyzer Handbook. Prentice Hall, 1982.
Open University. Instrumentation (T291). Open University Press, 1975.
Pynn C. Strategies for Electronic Test. McGraw-Hill, 1986.
Seippel R. G. Transducers, Sensors and Detectors. Prentice Hall, 1983.
Sydenham P. Transducers in Measurement and Control. The University of New England Publishing Unit. Australia, 1975.
Usher M. J. Sensors and Transducers. Macmillan, 1985.
Warring R. H., Gibilisco S. Fundamentals of Transducers. Tab Books, 1985.
Woolvet G. A. Transducers in Digital Systems. Peter Perigrinus, 1977.

- Взаимные помехи 117
- Вибрация 74
- Влажность 94
- Внешние условия 14
- Время нарастания 40
- отклика 13
- Выброс кривой 40
- Газовый анализ 110, 111
- Гидрофон 102
- Гистерезис 12
- Давление 90
- Датчик 9, 104
- приближения 72
- Движение 60
- Демпфирование 40
- критическое 41
- недостаточное 41
- Детектор 9, 104
- фотонный 104
- Деформация 59
- Динамометр 77
- Защитное кольцо 123
- Измеряемая величина 5, 7
- Индуктосин 72
- Интенсивность 104
- Каскад сопряжения сигналов 8
- Кислотность 23, 107
- Кодирующее устройство 61
- Кольцевая частота 40
- Коэффициент демпфирования 41
- масштабный 11
- чувствительности 59
- шума 125
- Линейность 11
- Линия связи 7
- Масса 77
- Микрофон 99, 100
- Мост Уитстона 27
- Напряжение 59
- Отказ 44
- Перемещение 60
- Пирометр радиационный 56
- Погрешность 10
- Полоса преобразователя 14
- Постоянная времени 38
- Предел 12
- Преобразователь 5
- активный 9
- входной 7
- выходной 9
- давления 92
- емкостный 19, 67
- индуктивный 21, 22
- ионизационный 23
- линейный 11
- обратной связи 9
- параллельный 131

- пассивный 9
- полупроводниковый 30
- потенциометрический 22, 66
- пьезоэлектрический 20, 76
- резистивный 25
- термоэлектрический 33
- ультразвуковой 103
- фотопроводящий 24
- фотоэлектрический 24, 31
- электромагнитный 21
- электромеханический 22
- Преобразующий элемент 15
- Принцип последовательного приближения 129
- Проводимость 109

Разрешающая способность 10
Расход 82
Расходомер 87—89

Сельсин 71
Сила 77
Скорость 80
Собственная угловая частота 40
Солнечный элемент 25

Тахометр 80
Темновой ток 32
Температурная компенсация 114, 115

Тензодатчик 29, 50
Тензометр 59, 76
Тензометрический мост 114
Тепловой приемник 106
Термопара 33, 51, 54
Термостат 58
Точность измерения 10
Трансмиссивер 9

Угловая скорость 80
Управление 6
Уровень 95
— жидкости, методы определения 95—99
— звука 100
— звукового давления 100
— квантизации 129
Ускорение 74

Формирование сигнала 6, 16
Фотодиод 31
Фототранзистор 32

Чувствительность 11
Чувствительный элемент 9, 15

Шифратор абсолютный 63
— приращения 62
Шумы 117, 124

Эффект Зеебека 33
— Холла 32

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Введение	5
Глава 2. Принципы преобразования	19
Глава 3. Характеристики и конструкции преобразователей	35
Глава 4. Теплотехнические измерения	46
Глава 5. Измерения свойств твердых тел	59
Глава 6. Измерение свойств жидкостей и газов	82
Глава 7. Акустические и оптические измерения	99
Глава 8. Химические измерения	106
Глава 9. Сопряжение преобразователей с измерительной аппаратурой	112
Послесловие переводчика	133
Список литературы	135
Алфавитный указатель	136

Справочное издание

БРИНДЛИ КЕЙТ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Заведующий редакцией *А. Б. Желдыбин*

Редактор издательства *А. А. Устинов*

Художественные редакторы *Т. А. Дворецкова, Г. И. Панфилова*

Технический редактор *Г. С. Соловьева*

Корректор *Н. А. Смирнова*

ИБ № 3528

Сдано в набор 02.04.91. Подписано в печать 10.06.91. Формат 84×108¹/₃₂.
Бумага типографская. Гарнитура литературная. Печать высокая.
Усл. печ. л. 7,56. Усл. кр.-отт. 7,77. Уч.-изд. л. 7,08. Тираж 60 000 экз.
Заказ 760. Цена 1 р. 50 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Государственная ассоциация предприятий полиграфической
промышленности «АСПОЛ»

Владимирская типография
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

Готовятся к выходу в свет

Крибель Х. Схемы любительских электронных устройств: Пер. с нем. — 13 л.

Подробно описаны схемы 30 электронных устройств: бытовой и автомобильной электроники, радио- и звукотехники, самодвижущихся игрушек и моделей, фото- и кинотехники, измерительных приборов (в том числе детекторов ионизирующих излучений), источников электропитания (в том числе на солнечных элементах). Схемы выполнены на стандартных элементах и опробованы на практике. Приведена таблица используемых в схемах полупроводниковых приборов и их отечественных аналогов

Для начинающих радиолюбителей, конструкторов электронной техники, а также лиц, занимающихся самостоятельным техническим творчеством.

Практическое руководство по расчетам схем в электронике: Справочник: В 2 т. Т. 1: Пер. с англ. — 45 л.

В первом томе приведены основы анализа электрических цепей, характеристики элементов, правила выбора полупроводниковых приборов. Включены главы по усилителям звуковой частоты, резонансным усилителям, цепям

обратной связи, генераторам сигналов, источникам питания. Даны сведения по операционным усилителям. Изложены основы цифровой и видеотехники.

Для широкого круга специалистов в области электротехники, электроники и радиотехники, а также для радиолюбителей.

Практическое руководство по расчетам схем в электронике: Справочник: В 2 т. Т. 2: Пер. с англ. — 40 л.

Во втором томе рассмотрены принципы построения микропроцессорных систем, передачи информации в аналоговой и цифровой формах, основы электроизмерений. Включены главы по линиям связи, фильтрам, основным типам направленных антенн и СВЧ-линий передачи. Приведены сведения по толсто пленочной технологии и волоконно-оптическим системам.

Для широкого круга специалистов в области электротехники, электроники и радиотехники, а также для радиолюбителей.

Ленк Дж. Домашний аудио-видеокомплекс. Руководство по эксплуатации и устранению неисправностей: Пер. с англ. — 21 л.

Представляет собой краткий справочник пользователя блочной радиоэлектронной аппаратуры. Содержит описание принципа действия, правильной эксплуатации и несложного ремонта системы, включающей модули: телевизора, видеоманитофона, кассетной магнитофонной приставки, цифрового лазерного проигрывателя, проигрывателя, проигрывателя с тангенциальным тонармом, тюнера, полного усилителя низкой частоты, пульта дистанционного управления.

Для широкого круга читателей, радиолюбителей, владельцев бытовой звуко- и видеотехники отечественного и зарубежного производства.

Рейкс Ч. Д. 55 схем электронной сигнализации: Пер. с англ. — 15 л.

С помощью сигнальных устройств, описанных в книге, можно обеспечить охрану дома и имущества, они применимы для установки и в служебных помещениях. Все устройства доступны для повторения начинающему конструктору, не обладающему глубокими познаниями в электронике. Приведены принципиальные (а иногда и монтажные) схемы электронных устройств сигнализации, даны рекомендации по сборке и настройке, а также советы по установке системы в доме, комнате или автомобиле. Для зарубежных электронных элементов дана таблица отечественных аналогов.

Для любителей-конструкторов электронной техники, занимающихся самостоятельным техническим творчеством.

Глущенко А. А., Мазепа А. А., Мазепа В. А. Измерительные приборы любителям. — 14 л.

Кратко изложены методы измерений, а также принципы построения и работы измерительных приборов. Приведены описания конструкций любительских, измерительных приборов различного функционального назначения, применяемых для проверки исправности и определения параметров движения.

Для начинающих и квалифицированных любителей-конструкторов, занимающихся практической электроникой.

Пелька Г. Цифровая обработка видеосигналов: Пер. с нем. — 8 л.

Практические аспекты цифровой обработки видеосигналов в системах цифрового телевидения описаны на уровне структурных схем и функциональных решений, а также их конкретных реализаций в виде электрических схем, новых разработок ряда зарубежных фирм, в частности DIGII 2000 фирмы ITT. По характеру изложения книга является кратким справочным пособием по схемотехническим решениям цифровых телевизионных систем.

Для инженеров-разработчиков видеоаппаратуры, а также широкого круга читателей и любителей теле- и видеотехники.

Пенфолд Р. А. Синтезаторы для музыкантов: Пер. с англ. — 12 л.

Рассмотрены принципы работы электронных синтезаторов, предназначенных для генерации, модуляции и синтеза различных звуков. Показаны способы обращения с аналоговыми и цифровыми синтезаторами звука, использования их электронной памяти. Даны пояснения процессов формирования звуковых эффектов, моделирования звучания различных акустических источников и управления электронными музыкальными инструментами.

Для широкого круга читателей, музыкантов, любителей электронной техники, инженерно-технических работников студий звукозаписи.

Кайнка Б. Измерения, регулирование и управление через интерфейс RS232: Пер. с нем. — 14 л.

Представляет собой пособие по проектированию аппаратных и программных средств,